量子空间

通往万物理论的新途径

QUANTUM SPACE

Loop Quantum Gravity and the Search for the Structure of Space, Time, and the Universe

[英] 吉姆·巴戈特 / 著
（Jim Baggott）

齐师傍 / 译

中信出版集团

版权信息

书名:量子空间

作者:[英]吉姆·巴戈特

译者:齐师傍

ISBN:9787521710540

中信出版集团制作发行

献给

献给卡洛·罗韦利和李·斯莫林

谢谢你们把故事托付给我

序言

让我们直奔主题吧：这是一本关于圈量子引力（loop quantum gravity）的书。圈量子引力是当代物理学家尝试发展量子引力理论的方法之一，它触及我们对空间、时间以及物理宇宙的了解的极限。有人希望前沿科学总能写成科普书籍供大众读者消遣，但我要先声明一件事：圈量子引力同所有其他量子引力理论一样，没有得到任何观测或实验证据的支持。(注)

你可能会问我，那你凭什么觉得读者会对这样的理论感兴趣呢？

理由如下。毋庸置疑，在21世纪的开头几十年，我们面临着很多巨大的经济、政治与环境难题，有些还极其顽固，难以处理。但在我们理解时间与空间的本质、理解物理实在的内部构造方面，量子引力理论是我们这个时代最大的科学难题。(注)它讨论的是关于存在本质的“大问题”。解决这个问题不仅需要深厚的科学专业知识，也需要洞察力与灵感出现的独特瞬间，还需要整个物理学史上的人物都无法超越的智力创造性。

原因很简单。如今，我们很幸运，我们拥有两大极其成功的物理学理论。第一个是阿尔伯特·爱因斯坦提出的广义相对论，它描述了弯曲时空中物质的大尺度行为，告诉我们引力的工作机制：物质告诉时空如何弯曲，弯曲的时空告诉物质如何移动。这一理论是如今大爆炸宇宙学标准模型的基础，我们用它描述宇宙的演化：从最初的“开端”（根据如今的证据，大概在138亿年前）到今天。支持该理论的证据有很多，美国的激光干涉引力波天文台（LIGO）以及意大利的室女座引力波天文台（Virgo）探测到的引力波，只是众多证据中最近的一项。

第二个极其成功的理论就是量子力学。量子力学描述了最小尺度——分子、原子、亚原子、亚核粒子尺度的物质与辐射的性质和行为。在量子场论的外衣之下，量子力学的基础是粒子物理标准模型。整个宇宙中可见的组成部分（包括恒星、行星以及我们自身）都是由基础模型中的夸克、电子，以及传递力的光子等粒子结合在一起组成的。标准模型也告诉我们大自然的其他三种力——电磁力、强相互作用力和弱相互作用力是如何作用的。位于瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心（CERN）发现了希格斯玻色子，这是支持量子力学的众多证据中最近的一项。

然而，尽管这两个理论都是极为成功的伟大的智力创造，这两个标准模型也充满了漏洞。有很多现象不能用这两个理论解释，也有很多问题是它们无法回答的。它们的成功似乎只带来了一个结果，就是让我们的宇宙变得更为神秘难解，甚至完全匪夷所思。似乎我们了解得越多，理解得就越少。

这两个理论在根本上是不相容的。在艾萨克·牛顿的经典力学中，物质的存在与事情的发生都在一个绝对空间与时间的“容器”中，这个“容器”作为背景而存在。如果我们把牛顿宇宙中的一切事物都拿掉，理论上还应该留下一个空的容器。广义相对论则把这个容器拿掉了：在爱因斯坦的宇宙中，空间和时间是相对的，不是绝对的，而理论则是“背景无关”的。时空是动态的，它之所以存在，是因为它是物质与能量之间物理相互作用的结果。

量子力学虽然有些地方看起来极为奇怪，但其至今提出的一切预言都已被验证。它的表述方式不同于广义相对论：与物质和辐射的基本粒子相关的相互作用，都被假设发生在一个绝对时空的容器之中——正是广义相对论所消灭的那个容器。也就是说，量子力学是背景相关的。

总结一下，我们有一个背景无关的经典（非量子）的时空理论，又有一个背景相关的关于物质和辐射的量子理论。我们最成功的两大物理学理论建立于不相容的时空观上，它们有着不同的结构：广义相对论的

时空是在物理学定律的基础上与之共同产生的，而量子力学的时空则是事先预设的、绝对的。

虽然有这么两套互不相容的描述，但据我们所知（以及所能证明），我们的宇宙只有一个。广义相对论和量子理论的不相容性之所以是个问题，就是因为我们相信宇宙在诞生初期（大爆炸之时）处于量子尺度，自然应该能被量子力学解释。也许你觉得我们无法解释宇宙的起源以及其极早期的状态也没什么，但鉴于物理学在近百年里取得了如此辉煌的成就，我们理当对它有更高的期望。我们需要一个量子引力理论。

看到这里，你开始感兴趣了吗？

中国古代哲学家老子曾经说过："千里之行，始于足下。"要想得到量子引力理论，第一步就是要认识到，要想将量子力学与广义相对论统一起来，我们需要找到一种新的时空结构，即一种新的看待时空的方式，这种方式要能同时在各种尺度上与物理学理论兼容。

有了这样一个目标，下一步就是选择走哪条路了。我们是从预设绝对时空结构的量子力学出发，还是从时空与之共同产生的广义相对论出发呢？

在过去的40年中，关于这两条路孰难孰易的判断分歧，已经将理论物理界分成了水火不容的两派。如果你尝试梳理一下所有尝试发展量子引力理论的方法的来龙去脉，就会发现这条分界线是清晰可见的，它分成了本质上不同的两支：一支是弦论，一支是圈量子引力理论。[注]两派之间的差异并不是广义相对论研究者与粒子理论物理学者之间的差异，因为不管哪一派都频繁地借用了广义相对论与量子场论的思想与技巧。

然而，不得不说，理论物理学界如今正为粒子理论物理学家所主导，而粒子理论物理学家确实更倾向于弦论。在过去的20年中，擅长公

关的弦论研究者撰写了大量的大众科学书籍，因此几乎没有读者意识到还有另一条通往量子引力理论的路。比方说，就在近期的一本关于引力的科普书中，圈量子引力仅出现在一个脚注里。[注]这一现象的形成有多个原因，我会在下文中讨论其中一部分。

这本书讲的是一条少有人走的路。它从广义相对论出发，借用了量子色动力学（QCD）中的一些思想，也包含致力于让结果与量子场论相容的探索。在路的终点，我们会看到空间的结构变成了量子的，而非连续的。就像量子力学中的物质和辐射一样，它是一块一块的。这一结构是一种由互相连接的引力“圈”形成的“自旋网络”系统。这些圈的形状有根本上的限制，它定义了普朗克长度尺度上的面积量子和体积量子（普朗克长度约为1.6×10^{-35}米，即质子直径的10^{20}分之一）。

不同的自旋网络，也就是圈的不同连接方式，定义了空间形状的不同量子态。自旋网络的演化（即一种形状和下一种形状之间的连接的变化）就产生了自旋泡沫（spinfoam）。在叠加态中加入自旋泡沫，就产生了一个新出现的时空，即一种由量子物理学定律共同产生的结构。

这就是圈量子引力理论，简称LQG。这一理论已经诞生30年了，目前全世界大概有30个研究组在研究它。始于相对论的这条路很难走，崎岖不平。这条路上还有很多有待克服的困难，尤其是要找到一种方式，使这一理论提供一个或更多明确的经验检验。但正如LQG的主要构建者之一卡洛·罗韦利（Carlo Rovelli）不久前所解释的那样：“在我看来，量子引力领域的状况……比25年前好太多了，而且它还在日新月异地发展，我对它很乐观。”[注]

科普读者可能从李·斯莫林（Lee Smolin）写的书中了解过圈量子引力，他是圈量子引力的另一位主要构建者，在2000年出版了《通向量子引力的三条途径》（*Three Roads to Quantum Gravity*）一书。他在2006年首次出版的《物理学的困惑》（*The Trouble with Physics*）和最近出版

的《时间重生》（*Time Reborn*）中也简要提到了圈量子引力。罗韦利则在他的畅销书《七堂极简物理课》（*Seven Brief Lessons on Physics*）和《现实不似你所见》（*Reality is Not What It Seems*）中提到了圈量子引力。

我写这本书，是为了纠正公众观念的偏倚。我想要说服读者：圈量子引力不仅是一个好的理论，而且还提供了一条除弦论之外的真正的、可靠的通往量子引力的道路。为了实现这个任务，我将与你分享斯莫林和罗韦利在他们自己的畅销书里没有提到的更多细节。我不仅要让你基本了解圈量子引力理论是如何看待空间、时间和宇宙的，还要告诉你它为何要讲述这些事情，又是如何讲述的。

在调研和写作这本书时，我很幸运地得到了斯莫林与罗韦利的大量鼓励和支持，听到了他们的深刻见解。这本书讲述的是他俩的故事，但我还要说明的是，圈量子引力理论是多位理论物理学家通过多年的努力才建立起来的。我已经尽了一切努力以通俗的方式把他们的工作呈现在读者面前，而如果我让这个群体中的任何一位物理学家感觉自己的贡献没有得到良好的展现，甚至被忽略了，那么我提前向他们表示歉意。出于同样的原因，这本书专注于讲述斯莫林与罗韦利两位主要贡献者的故事，它不是为了全面总结圈量子引力名下的每一项贡献而写作的。注

这本书由三部分组成。第一部分是故事的背景，告诉我们斯莫林与罗韦利在学生时代学习的相对论、量子力学与大爆炸宇宙学的内容，以及他们成为成熟的理论物理学家后这些领域的发展状况。如果你已经对这部分背景知识比较熟悉了，可以放心地跳过这部分内容，这不会影响阅读（但我还是希望你不要跳过）。第二部分讲述了圈量子引力理论的诞生与演化。它始于20世纪50年代末将相对论与量子力学统一起来的尝试，阿贝·阿什特卡（Abhay Ashtekar）发现的“新变量”使它成为可能。到20世纪末，阿什特卡、斯莫林、罗韦利（以及其他很多人）的合作产生了面积与体积量子，以及自旋泡沫的数学形式。第三部分介绍了该领

域迄今为止的新进展。它总结了用圈量子引力来计算我们熟悉的物理量的尝试，以及该理论对于量子宇宙学与黑洞物理学的意义。在旅程的这一部分，我们还会遇到量子力学的诠释问题，以及时间的实在性（或不实在性）的问题。

我还要提醒你最后一件事情：同弦论或M理论框架一样，圈量子引力仍然是一个发展中的理论。它还没有完成，有很多问题我们还不能回答。斯莫林与罗韦利自然是该理论的热烈支持者，尽管我努力平衡各方面的观点，我所采用的语句仍然会不可避免地反映他们的热情。但我们千万不能被热情冲昏了头脑。在圈量子引力理论的发展道路上，有很多其他理论物理学家在不同的阶段加入，但他们如今都已对其失去了信心。20世纪90年代末的乐观态度如今已经变成了更冷静（也更悲观）的评估分析，有些物理学家已经完全离开这一领域，去研究其他课题了。我希望读者至少能意识到理论物理学家面临的是一个多大的挑战——追寻量子引力理论绝不是胆小的人可以做的事。在这本书的结尾，我加入了一篇斯莫林、罗韦利和我的三人谈话记录，我们回顾了近期的发展历史，也展望了未来。

现在，理论物理学的发展正处于紧要关头。科学上的伟大革命塑造了我们对现实的理解，进而深刻地改变了我们对空间、时间以及对宇宙的理解。下一场革命，是否已经近在咫尺？

如果李和卡洛不是如此地信任我，并将他们的故事托付于我，这本书就不可能完成。我要感谢他们对这项写作计划付出的努力，他们在我写草稿时就是俯身于我背后浏览内容的读者，指引我走向正确的方向，在我犯错误时纠正我。之前我已提醒过大家，这本书里的所有观点都只是我的观点，虽然李和卡洛同意其中大部分观点，你也不应该假设他们同意书里的所有观点。

除了李和卡洛以外，我还要感谢众多科学家，他们在繁忙的工作之余挤出宝贵的时间审读我的草稿，纠正了许多错误的结论和诠释，并加

上了他们自己的深刻见解。他们包括：宾夕法尼亚州立大学的阿贝·阿什特卡、加州大学河滨分校的约翰·贝兹（John Baez）、宾夕法尼亚州立大学的马丁·博约瓦尔德（Martin Bojowald）、墨西哥国立自治大学的亚历杭德罗·科里基（Alejandro Corichi）、开普敦大学的乔治·埃利斯（George Ellis）、马里兰大学的特德·雅各布森（Ted Jacobson）、诺丁汉大学的基里尔·克拉斯诺夫（Kirill Krasnov）、路易斯安那州州立大学的豪尔赫·普林（Jorge Pullin），以及哥伦比亚大学的彼得·沃伊特（Peter Woit）。

现在，圈量子引力理论的构建远称不上已经完成。这意味着，哪怕是一直紧密参与该理论发展过程的理论物理学家，对于该理论中很多悬而未决的问题都未必有一致的结论。为了对这个几乎一切观点都可能受到质疑的课题进行尽可能一致且易读的叙述，我不得不在内容的呈现方面做一些选择。我很确定自己在这个过程中犯了一些错误，也乐于承认自己犯下的错误。

我还要感谢我在牛津大学出版社的编辑莱瑟·梅农（Latha Menon），以及珍妮·纽吉（Jenny Nugee）——她为最终呈现到你们手中的这本书的英文版做了大量的工作。如果没有他们的努力，这本书的内容不可能这么丰富。

现在，让我们开始这趟旅程吧。

吉姆·巴戈特

2018年7月

---

1. Joseph Conlon’s readable and engaging book Why String Theory?,published in 2016,offers a similar assessment of the evidence for string theory.Chapter 7,titled ‘Direct Experimental Evidence for String Theory’,consists of just a single sentence,which reads ‘There is no direct experimental evidence for string theory.’ Joseph Conlon,Why String Theory?,CRC Press,Boca Raton,FL,2016,p.107.

2. This is my view and,of course,not all scientists agree.For example,South African cosmologist George Ellis argues that the greatest scientific challenge is consciousness (personal communication,25 October 2017).

3. Jakub Mielczarek and Tomasz Trzesniewski,‘Towards the Map of Quantum Gravity’,arXiv:hep-th/1708.07445v1,24 August 2017.

4. Marcus Chown,The Ascent of Gravity: The Quest to Understand the Force That Explains Everything,Weidenfeld & Nicolson,London,2017.The footnote in question appears on p.252.

5. Carlo Rovelli,‘Loop Quantum Gravity: The First 25 Years’,Classical and Quantum Gravity,28 (2011) 153002; arXiv:gr-qc/1012.4707v5,28 January 2012,p.20.

6. Those with a background in physics might want to consult a recent volume of reviews written mainly by young LQG researchers:Abhay Ashtekar and Jorge Pullin (eds),Loop Quantum Gravity: The First 30 Years,World Scientific,Singapore,2017.

缩略语列表

ADM 阿尔诺威特-德塞尔-米斯纳

ATLAS 超环面仪器（LHC中的探测器之一）

CDM 冷暗物质

CERN 欧洲核子研究组织

CMS 紧凑μ子线圈（LHC中的探测器之一）

COBE 宇宙背景探测器

CODATA 国际科技数据委员会

GeV 吉电子伏特

GUT 大统一理论

∧-CDM ∧-冷暗物质

LHC 大型强子对撞机

LQC 圈量子宇宙学

LQG 圈量子引力理论

MeV 兆电子伏特

MSSM 最小超对称标准模型

NSF 美国国家科学基金会

QCD 量子色动力学

QED 量子电动力学

SLAC 斯坦福直线加速器中心

SUSY 超对称

TeV 太电子伏特

WMAP 威尔金森微波各向异性探测器

前言 理解大自然的奥秘，无法抗拒的渴望

理论物理对于它的研究者来说有某种独特的吸引力，这么说应该并非全无道理。研究这个领域需要敏锐而富有创造力的思维，也需要一种能够理解深奥概念与复杂数学的特殊天分。某种程度上可以说，是这类人自己选择了投身理论物理研究。这类人中的大多数对物质财富并没有多少兴趣，但如果我们要深入讨论这个处于理解现实本质与物质存在最前沿的学科领域，我们就必须承认，理论物理需要研究者有另外一个共同的性格特征。

理论物理钟爱叛逆者。

这么说吧：如果你要改变我们对时空本质结构的理解，如果你要颠覆世界，推翻我们对于更大宇宙的看似毫无问题的现有认识，你就不能在意别人怎么想。

许多叛逆者是为了逃离尘世生活才选择了理论物理。在这里，他们可以远离现实生活的不公、纷繁复杂的人事，以及少年时与旁人的格格不入，他们可以最大程度地发挥自己的直觉。如果说其他领域鼓励一定程度的叛逆思维，那么理论物理远远不止于此——叛逆思维是必备条件。

在俄亥俄州辛辛那提的沃尔纳特希尔斯高中，16岁的李·斯莫林对革命政治、摇滚明星、数学、建筑学和他的女朋友（排名不分先后）都兴致盎然。他的老师们觉得他脑子不够灵光，建议他不要选高阶的数学课程，而作为一名叛逆者，他为了证明老师们错了，在短短一年时间里完成了三年的课程。这个举动在有些人看来也许算不上激进，也不像玩摇滚或者出版地下报刊那么具有颠覆性，但这让斯莫林发现高阶数学课

程“也挺好玩儿的”[注]。

在高二的时候，他对建筑学产生了兴趣，并邀请了离经叛道的建筑师、系统理论学家理查德·巴克敏斯特·富勒（Richard Buckminster Fuller）来他所在的高中做报告。富勒设计的短程线穹顶让斯莫林对一个名叫张量分析的数学分支领域产生了兴趣，而他又在阅读与此相关的书籍的时候接触了爱因斯坦的相对论，以及爱因斯坦本人。

高三那年，斯莫林的世界崩塌了：他追的摇滚乐队解散了，他的女朋友跟他分手了，而他的“政治革命”也没能实现。他的化学挂了科，而他在物理学上似乎缺乏天分，因此没能选上物理学的课。斯莫林决定退学。

就在这个时候，他在公共图书馆里读到了改变他一生的那本书，书名叫作《阿尔伯特·爱因斯坦：哲学家–科学家》（*Albert Einstein:Philosopher-Scientist*），由西北大学的哲学家保罗·阿瑟·席尔普（Paul Arthur Schilpp）编著，初次出版于1949年。这本书的第一章是67岁的爱因斯坦写的自述，爱因斯坦称其为“类似于写给自己的讣闻”[注]。他的文字直接写进了梦想破灭、万念俱灰的斯莫林的心里。

爱因斯坦提到，“大多数人花毕生的时间去追逐一些毫无价值的希望和努力。”他早在少年时期就“深切地意识到这种追逐并不轻松，甚至有些残酷，不过，这在当年被精心地用比如今更伪善和漂亮的字句伪装起来”。爱因斯坦拒绝通过有组织的宗教来获得内心的安宁，转而从物理学中寻求安慰：

有一个不可知的世界在我们之外存在着，它的存在并不取决于我们人类的主观意愿。尽管它是一个高深而永恒的谜，但值得庆幸的是，我们人类至少可以部分地用观察和思维触及它。这个世界深具魅力，犹如争取自由、得到解放一样，吸引我们的凝视深思。而且不久我就注意到，在这项事业中，许多我所尊敬和钦佩的人找到了内心的自由和安

详。[注][注]

就在当晚，斯莫林决定成为一名理论物理学家。与爱因斯坦一样，他受“理解大自然奥秘的无法抗拒的渴望”所驱动。[注]“当时我心里浮现出这样的念头：如果我这辈子不能做其他的事情，那么也许我可以成为一名理论物理学家。”[注]

而这可不是什么好的决定。当时，斯莫林已经被罕布什尔学院建筑学专业录取，这是位于马萨诸塞州阿默斯特的一个激进自由的艺术学院，他只得艰难地转专业。幸好他也不是完全毫无准备：他的母亲是辛辛那提大学的英语教授，母亲帮他选上了一门该校的广义相对论研究生课程，由保罗·埃斯波西托（Paul Esposito）教授。这是他上的第一门物理学课程。

炎热的夏天里，斯莫林在洛杉矶的范纳伊斯取暖与空调公司当金属冲压工学徒，在学校与公司之间穿梭，在业余时间则自己阅读基础物理学、相对论和量子力学的相关书籍。

卡洛·罗韦利的理论物理学之路发生在另外一个大洲，在另外一个语言环境中，其细节也不同。但他的经历与斯莫林有一些显著的相似之处。

罗韦利也曾对成年人构建出来的这个既不平等也不正义的世界充满失望。他在维罗纳长大，这是意大利北部的一个城市，离威尼斯不远。当时，意大利的偏远地区蔓延着一股怀念法西斯主义的气氛，罗韦利激烈反对这种思想。他经常与老师发生激烈的冲突，并反抗自己所在的高中权威（这所传统的高中教学生基础的课程，让他们考上大学）。他也渴望逃离自己的家庭：他是父母的独子，母亲对独子的爱可以给人抚慰，也可能会让人窒息。[注]罗韦利迫切地需要喘口气。

他如饥似渴地阅读政治学、社会学和科学相关的书，也看小说和诗

歌。20岁那年，罗韦利踏上了一场寻找真理的环游世界之旅。在旅途中，他强烈地感受到了自由，也学到了如何掌控自己的生活并追寻自己的梦想。但当他远离了自己一直以来在各种方面痛恨的故乡以后，他的看法发生了一些转变。意大利的确有很多让他愤怒的地方，但在那里也有很多事物有待他学习。而且他想念他在意大利的女朋友了。

回到意大利以后，罗韦利就进入博洛尼亚大学学习物理学。博洛尼亚大学是全世界最古老的大学，建立于1088年。进入博洛尼亚大学读书对罗韦利来说是个偶然，并非有意计划。读高中时，他在数学和物理学方面表现出了天赋，但他最喜欢的学科是哲学。不过，他不想把哲学当成大学的专业，因为他不相信当时的大学教育系统能帮助年轻的理想主义者重视并严肃对待他所关心的哲学问题。

博洛尼亚城以艺术、文化和历史建筑知名，尤其是红砖屋顶景观，反映了该城市的共产主义政治倾向。而这正合罗韦利的心意。在博洛尼亚求学期间，他与观点相似的朋友们建立了一个有共同目标的团体，他们都信奉后嬉皮士非主流文化。这个群体服用迷幻药，实践多种多样的生活方式与爱情关系，还养了一只名叫卢克雷齐娅（Lucrezia）的山羊。他们梦想通过一场和平的文化上的革命，让世界变得更美好。

这种公社的生活方式并没有影响罗韦利学习物理学。他在学习的时候极为专心致志，甚至会忘记周围其他一切事情。有一天，一位建筑工人来到他们所住的那座破旧的房子，要拆除一面内墙。噪声持续了几个小时之久，而罗韦利工作的房间离拆除地点只有几米远。当被问及建筑工人有没有打扰到他时，正在看书的他抬起头茫然地问："什么建筑工人？"[注]

1976年2月，罗韦利加入了艾丽斯电台（Radio Alice）。这是一个自由电台，旨在"为每个人递上麦克风，让大家自由交流经历和梦想"。[注]电台的话题包括工人抗议活动、政治评论、诗歌、瑜伽、烹饪、爱的

表白，以及贝多芬和美国摇滚乐队杰斐逊飞机（Jefferson Airplane）的音乐。

这是罗韦利一生中的一个决定性时期，而当他的政治梦想逐渐消退时，他意识到“一个人要想改变世界，不是那么容易的”。

梦想破灭、困惑不已的罗韦利必须做出决定，在接下来的一生中该做些什么。这个时机也许完全出于偶然。他之所以选择学物理，是因为他必须学点儿什么（除了哲学以外），而他也很愿意通过上学来逃避服兵役的义务。大三时，他终于直面20世纪初完全颠覆了物理学的观念革命。在量子力学和爱因斯坦的相对论中，罗韦利发现物理学和哲学不仅发生了碰撞，甚至变得你中有我、我中有你，难以区分了。

爱因斯坦再次给了罗韦利灵感。在完成了相对论方面的工作后，爱因斯坦为自己的理论写了一套面向大众的阐释，并称之为“小册子”。这本书在1917年春天首次出版，以德语写成，题为《狭义与广义相对论浅说》［*Relativity: The Special and the General Theory*（*A Popular Exposition*）］。爱因斯坦自己对这本书并不满意，后来曾开玩笑地说，尽管这本书封面上称它“基本可以看懂”，但其实基本不能看懂。

不过，这本书仍然极受欢迎，被多次再版、翻译、重印。在再版的过程中，非物理学专业人士的读者（以及出版商）急切地要求这本书在数学上解释得更加清晰一些，而在这段时间里，支持相对论的观测与实验数据也日益增多。

1953年，74岁的爱因斯坦为这本小册子写了第五篇附录，题为“相对论与空间问题”。这篇附录的风格与此前大不相同，包含一些关于时间与空间本质的深刻的哲学洞见。它代表了晚年的爱因斯坦在提出相对论后近50年内的深思。两年后，爱因斯坦即与世长辞。

在这篇附录中，爱因斯坦讨论了几个世纪以来盘桓在哲学家脑海里

的问题。他写道：“要给广义上的空间——尤其是空的空间——赋予物理实在性，确实是一项严苛的要求。从最古老的时候开始，哲学家们一直很抗拒这一假设。”[注]

这就是罗韦利最感兴趣的内容，他一下子就被吸引住了。这种物理学给他打开了一扇“既不放弃改变和冒险的渴望，又能保持思想的自由、保持自我”的窗户。[注]

斯莫林和罗韦利各自对探索自然奥秘的渴望，最终使得他俩走到一起，实现当代科学最高产、最喜人的合作之一，虽然目前阶段的两人还不知晓以后会发生的这些事。

为了理解这两位理论物理学家在长达30年的合作中都取得了什么样的成就，我们首先要理解他们在学生时期是如何学习物理学史上最伟大的两个理论——相对论和量子力学的，进而了解是怎样的黑暗秘密令这两个理论互不相容。

---

1. Lee Smolin,The Life of the Cosmos,Oxford University Press,Oxford,1997,pp.7–8.
2. Albert Einstein,in Paul Arthur Schilpp (ed.),Albert Einstein:Philosopher-Scientist,Harper & Row,New York,1959,p.3.
3. Ibid.,p.5.
4. 摘自《爱因斯坦自述》，富强译，新世界出版社，2012。——译者注
5. Albert Einstein,letter to F.Lentz,20 August 1949,quoted in Alice Calaprice (ed.),The Ultimate Quotable Einstein,Princeton University Press,Princeton,NJ,2011,p.19.
6. Smolin,The Life of the Cosmos,pp.7–8.
7. On Desert Island Discs,first broadcast on 2 July 2017 on BBC Radio 4,Rovelli said: ‘I grew up in a very lovely family,with a very loving Italian mother.I was an only child,completely immersed in this maternal love,which was great—it gave me security and it gave me strength,but it was also a prison from which I had to escape at some point.’
8. Carlo Rovelli,personal communication,19 August 2017.
9. Carlo Rovelli,What is Time? What is Space?,manuscript translated by J.C.van den

Berg,p.2.Published by de Renzo Editore,Rome,2006.

10. Albert Einstein,Relativity: The Special and the General Theory,100th anniversary edition,Princeton University Press,Princeton,NJ,2015,p.156.

11. Rovelli,What is Time?,p.3.

第一部分 基础

第1章 物理学定律面前人人平等

为何斯莫林和罗韦利会受爱因斯坦影响，被科学思想的革命所吸引，其原因不难理解。在他们听老师讲课、勤奋地读书，以及解答教科书上的经典习题时，他们的视野被打开了，看到了一系列非凡的可能性。

时间和空间在我们大多数人看来再平常不过，但斯莫林和罗韦利却对之提出了非常基本的问题，来探讨它们的本质——我们的物理现实的结构。虽然我们已经对时空的表象那么熟悉了，但爱因斯坦向我们证明，关于时空本质的答案并不是显而易见的。他告诉我们，我们可以推翻权威、克服偏见，追寻更加深刻的真理。他在年仅26岁时就走上了这条革命之路。虽然爱因斯坦对物理学的贡献在科学史上无人可比，但他的工作显然还没有完成，还差最后一步。

爱因斯坦在《狭义与广义相对论浅说》附录五的开头写道："牛顿物理学的特征在于，它给空间和时间赋予了独立而真实的存在，和物质一样。"[注]在爱因斯坦诞生前两百年，英国机械哲学家艾萨克·牛顿于17世纪构建的这种"经典"物理学体系要求空间和时间的结构是绝对的。绝对的时空观非常符合我们的日常经验，以至于如果你完全没有接触过相对论，你会不假思索地视绝对时空观为理所当然。

但出于哲学方面的理由（我们之后会看到，这些理由也是十分实际的），我们应该完全抛弃绝对时空的观念。

在绝对时空观里，绝对的空间形成了某种容器，容器之中，有一种神秘的宇宙节拍器标记着绝对的时间。在这样一个容器里，作用力对物体施加作用，事情不断发生。如果我们把宇宙中所有的物质都清除掉，

我们就不得不相信空的容器会留下，而节拍器仍然在宇宙中不断地滴答运转。这就意味着，宇宙中还有东西。

但剩下的到底是什么呢？根据逻辑，一切事物都存在于宇宙中，宇宙的定义就是如此。但绝对时空观暗示，宇宙本身即存在于这个容器中。如果沿着这个逻辑再推演一下，我们可以想象在宇宙外面有一个高高在上的点，从那里可以俯瞰整个宇宙——宛如上帝在俯瞰他创造的一切事物。

当然，想到这儿我们可以耸耸肩，认为抛开哲学（以及神学）上的意义之后，绝对时空观至少看起来是与我们的日常经验一致的。我们把东西放在哪儿，就能在哪儿找到它；我们上下班总是沿着同一条道路行走；我们的每一天总是从早晨开始。这些难道不都是我们物理现实的绝对性的体现吗？

但即使是这些日常现象，也并不是绝对的。只要稍微想一想，你就会发现，在表象之下，我们看到的物体仅仅是在互相靠近或者远离而已，改变的只是其相对彼此而言的位置。这就是相对运动，在我们的时空中，我们在原则上只能通过物体之间的相对关系定义物体的运动。牛顿也不得不承认，在我们普通人的日常生活中，确实只能如此。

因此，我们会设想使用坐标系（对于三维空间，我们使用三个两两垂直的坐标轴，分别标记为x、y、z），通过一个物体在某个时刻处于哪个位置，下一时刻又处于哪个位置来更精确地描述事物。这个方法好多了，或者说，看起来科学多了。

但不要高兴得过早，因为我们必须承认，这类坐标系的选取完全是任意的。

测量地球上的位置时，我们会使用另一套坐标系，它被称为经纬度，是由地球的形状和大小定义的。我们测量时间的系统的基础是地球

绕着太阳的运动，以及地球绕地轴的自转。这些系统看起来十分“自然”，但它们只对于我们地球生物而言是自然的，而且我们不能否认它们的选取实际上是十分任意的。像x、y、z或者经纬度这样的坐标系被称为参考系，我们可以在其中定位物体，并观察事情的发生。

我们还可以更进一步思考。任何做匀速直线运动的物体看起来都是从一个地方移动到另一个地方，但“移动”到底是什么意思呢？是说物体从这个地方以特定的速度移动到了那个地方，还是说物体其实是静止的，只是“那个地方”以同样的速度移动到了“这个地方”？

J.R.R.托尔金的著作《魔戒》的粉丝可能会想起皮平与甘道夫一同坐在捷影[注]上匆忙赶往米那斯提力斯的经历：“皮平慢慢进入了梦乡，他有种奇怪的感觉：自己和甘道夫端坐在一匹奔马的雕像上，像石头般一动也不动，与此同时，世界在狂风呼号中从他脚下滚滚而去。”[注][注]

在这种匀速运动的例子中，从原理上就没有任何观测或测量手段能告诉我们到底是哪一方在运动。当然，简单的逻辑推断就能告诉我们，上面那段话说的是捷影在静止的中洲上狂奔，但不可否认的是，我们永远无法证明这一点。

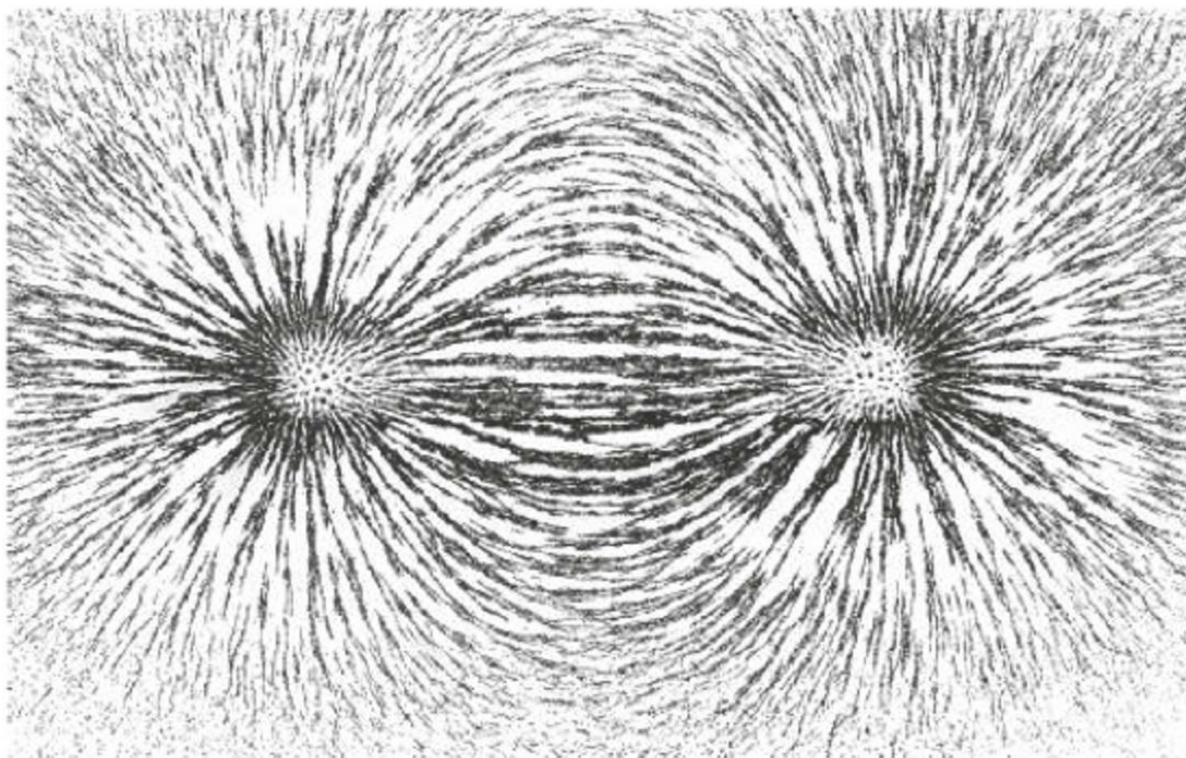
这类匀速运动完全是相对的，物理学家在所谓的“惯性”参考系的背景下定义它。从刚刚的描述中我们知道，宇宙中根本不存在绝对的坐标系，也没有绝对（或最终）的惯性参考系，因此也就没有绝对运动。所谓的“上帝视角”，根本不存在。

如果某个概念在原理上与观测或实验无关，也就是说，我们无法积累关于它的实证经验，我们就通常认为它是“形而上学”（metaphysics，字面意思是“超越物理学”）的。那么，为什么牛顿会坚持使用绝对时空观这种我们永远无法直接体验的、形而上学的系统呢？因为只有做出绝对时空的假设，他才能用相对简单的公式表示运动定律——众所周知，牛顿的运动定律是极为成功的。

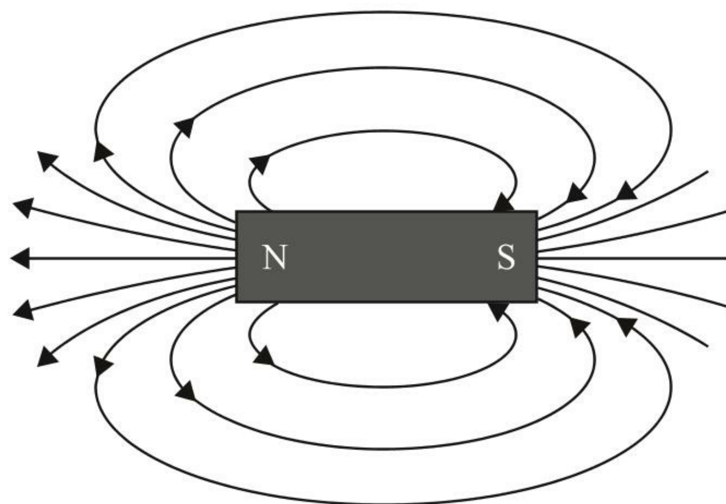
牛顿运动定律的成功给人们带来了极大的慰藉，也使得人们倾向于忽略这套理论描述所需要的有时极强的假设和前提条件。然而，在19世纪末，一股新的经验主义哲学力量正在生长壮大，逐渐获得了科学上的话语权。该哲学流派要求完全摒弃形而上学的构造，将其从科学中彻底清除。

经验主义哲学的势力正在积蓄，而在此时苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）打乱了他们的计划。

当时，种种实验证据表明，电现象与磁现象之间有着千丝万缕的联系。因此，从1855年开始，麦克斯韦在长达10年的时间里发表了一系列论文，将这两种不同但密切关联的现象分别用电场和磁场加以描述。我们可以用“力线”来形象地描绘这类场，它们通常从正电荷出发通往负电荷，或是从北极出发通往南极（见图1）。这类场绝不只是丰富的想象力的产物：当你试图把两块磁铁的北极对在一起时，你就能切实感受到它的存在。



（a）



（b）

图1 （a）将一把铁屑撒在一张平摊的纸上，再把纸放在一块条形磁铁上，你就能看到铁屑排成“力线”的形状，以北极与南极为两端向外伸展。（b）条形磁铁“力线”的简明图示。作为惯例，我们规定力线从北极（N）“流向”南极（S）

但这就已经不仅是物体在三维空间、一维时间里的运动了。麦克斯

韦的电磁场方程描述了一种完全不同的新的物理学。在空空如也的空间里，我们也能感受到磁铁周围的磁场（我们可以轻易地证实，磁场可以存在于真空中，它并不需要空气来传递）。实际上，对麦克斯韦方程组做一些简单的变形，就能清晰地描述波的运动了。

这与日益增多的支持光的波动说的证据完全相符，它说明光就是电磁辐射的一种形式。麦克斯韦方程组还可以进一步用于计算真空中电磁波传播的速度，结果证明就是真空中的光速，我们用符号c表示它。

但在科学史上（在生活中也是一样），某一瞬间的明确清晰，往往意味着其他方面会出现混乱。电磁辐射的本质现在看起来清晰明了、毋庸置疑，但另一方面，物理学家不得不承认，电磁波必须存在于某种介质中。

如果你把一块石头扔进湖里，你就会看见它在水面上产生了波纹。这种水波正是“介质中的波”的一个典型例子，就水波而言，介质就是水。没有哪种波不需要介质，电磁波也必须存在于某种介质中。麦克斯韦本人确信，电磁波一定是在“以太”中运动的——以太是一种假想中的稀薄的物质，它是电磁波的介质，充满整个空间。

所有的物理学实验和观测证据都表明，如果以太确实存在，它不可能参与可观测物体的运动。以太必须是静止的。如果以太是静止的，从定义上讲它就是绝对的：它充满了绝对空间所形成的容器。这样一来，静态的以太就定义了根本意义上的惯性参考系。

嗯……

问题来了，这里存在一些微妙的不同。牛顿定律要求空间是绝对的，只能静静地在那里当一个背景。从定义上讲，我们永远不可能体验到这种绝对空间。但现在麦克斯韦的理论告诉我们，我们的周围真的有一个绝对空间，其间充满了以太。这与牛顿的绝对时空观截然不同。

我们不妨这样想一下：如果地球在静态的以太中绕着地轴自转，我们应该就能在地球表面感受到一股“以太风”（实际上叫“以太曳引”，不过结果是一样的）。我们认为以太十分稀薄，因此我们也许并不能像感受风一样感受到它。但介质有另外一种可以测量的效应：假如一道声波沿着一股很强的风向我们传来，我们测量到的它的速度就会比无风时同样的声波快。因此可以预期，如果光顺着以太风的方向射向我们，我们测量到的光速就应该比逆着以太风的方向射向我们的光速快。如果以太是静态的，就意味着不同方向的光速是不一样的。

就算不同方向上的光速有差异，应该也会很小，但19世纪末的光学技术足以测量到这种差异了。但1887年，美国物理学家阿尔伯特·迈克耳孙（Albert Michelson）和爱德华·莫雷（Edward Morley）没能在实验中测量到光速的差异。在他们的实验精度范围内，光速是恒常不变的，与方向无关。他们的实验结果显示，根本就不存在静态的以太这种东西。

这类谜团把看似遥远的科学理论问题带到了我们的生活中。牛顿运动定律要求空间和时间是绝对的，而我们永远不可能体验到绝对时空，也无法获得任何关于它的经验证据。麦克斯韦的电磁波理论要求存在充满整个空间的静态以太，以容纳电磁波，但实验告诉我们并不存在这种东西。我们该怎么办呢？

就在这个时候，一位在伯尔尼的瑞士专利局工作的年轻的“三级技术专家”站了出来。1905年，爱因斯坦根据自己的物理学和经验主义哲学判断，要解决这个问题，我们需要一个新的理论，从完全实际的角度出发，让“观测者”位于舞台的中心。这里的“观测者”并不一定是人类。爱因斯坦引入这一概念的用意是，为了正确理解物理学，我们必须接受这样一个事实：每个人或者每个物体眼中的物理学过程，都只是他们（或它们）正在观察或用尺子和时间测量出来的物理学过程而已。

当然，这种观察者的默认设定属于牛顿理论。但牛顿理论又是通过

假设观察者位于整个现实的外部而建立的，换言之，观察者是站在“上帝视角”看着万物运转的。爱因斯坦则把观察者带回了舞台上，令其处于自己观察的现实之中。

爱因斯坦首先陈述了两条基本原理。第一条被他称为“相对性原理”，其内容是：以不同（但恒定）的速度匀速运动的所有观察者测量得出的物理学定律必须相互一致。换句话说，就是物理学定律对于所有匀速运动的观察者来说都应该是一样的，不管这些观察者移动得慢还是快，朝着哪个方向。此处的“定律”，指的就是物理量之间的关系。

由于人心难以撼动，斯莫林和罗韦利在政治运动上的抱负遭遇了挫折，但他们在第一次接触到相对性原理的时候，一定对其充满欣慰。至少在物理学的世界里，真正的民主是存在的。

第二条原理则与光速有关。在牛顿力学中，速度是可以简单相加的。如果在一艘横渡大西洋的轮船的甲板上有一个球在滚动，这个球的运动速度就是轮船的速度加上球相对于轮船的速度。但光不遵守这条规则：迈克耳孙–莫雷实验表明，光永远都以一个固定的速率运动。假设一艘轮船以光速c运动，那么放在其甲板上的手电筒发出的光相对地面的速度仍然是c，而不是$c+c=2c$。

爱因斯坦并没有尝试解释为何光速恒定不变，只是把这当作一个既定的事实，并以此为基础继续推导了下去。

与我们日常生活中熟悉的事物的速度比起来，光速快得令人难以想象。这意味着正常情况下，发生的事件几乎在同时就能被我们看到。在这里发生了一件事，我们瞬间就能看到，过了一会儿在那里又发生了另外一件事，我们也能顺利区分两件事在时间上的先后：这件事先发生，那件事后发生。爱因斯坦提出了一个简单又直接的问题。虽然光看起来好像能够瞬间传播，但它的速度并不是无穷大的。如果光从某个地方出发后，确实需要一定的时间才能到达我们的位置，这对我们观测时空中

发生的事件会有什么影响呢？

爱因斯坦发现，光速固定所产生的直接结果，就是绝对时间不存在了。

假设你观察到了一个惊人的现象。在一场雷暴中你看到两道闪电同时击中大地，一道在你左边，一道在你右边（见图2）。你完全静止，一动不动，因此两道闪电发出的光到达你所在处需要的时间是一样的。光传播的速度非常快，因此你在闪电出现之后的短短一瞬间就能同时看到它们。

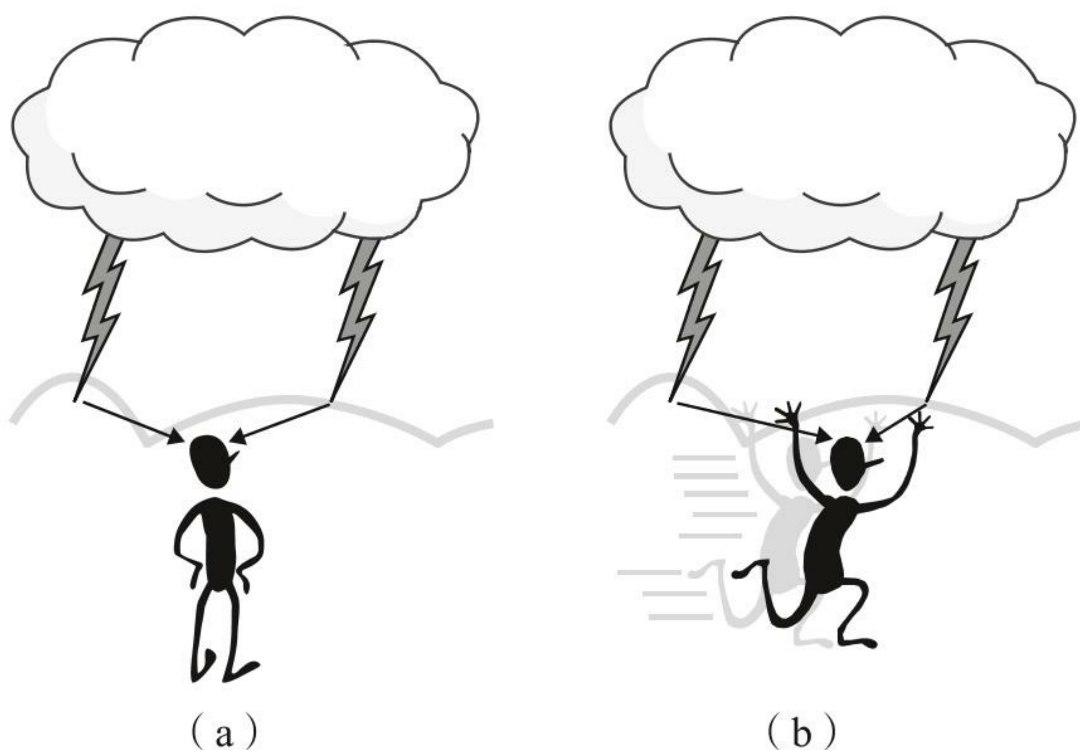


图2 （a）中静止的观察者同时看到两道闪电，而（b）中的观察者以不比光速慢多少的速度向右移动，则会先看到右边的闪电出现

然而，我看到的景象则完全不同。我以很快的速度（比如光速的一半）从左向右移动，在你观察的同时与你擦肩而过。因为我移动的速度非常快，当左边的闪电刚刚赶上我的时候，我已经到达中点右边的某个地方了，因此左边的闪电要多走一段路才能到达我的眼睛。而右边的闪

电则少走一段路，因为我已经在向它所在的方向移动了。结果就是右边的闪电先到达我的眼睛，也就是说我先看见右边的闪电出现。

在你眼中，两道闪电同时出现；而在我眼中，则是右边的闪电先于左边的闪电出现。那我们俩当中谁是对的呢？

两个人都对。相对性原理要求物理学定律对于每个人来说都是一样的，与观察者的相对运动无关。就像坐在捷影上的皮平无法区分是自己在移动还是周围的景色在移动一样，我们无法用物理测量手段分辨到底是我在运动还是你在运动。

我们别无选择，只能得出结论：绝对的同时性并不存在。并不存在哪个特定的，或者说“有特权的”惯性参考系，使我们可以宣布在这个参考系里两件事完全同时发生。两件事可能在某一个参考系中同时发生，而在另一个参考系中有先有后，但所有这些参考系都是彼此平等的，它们得到的结果都是准确有效的。因此，“真正的”或绝对的时间不存在。我们所感知的事件各不相同，因为时间是相对的。

你可能已经对这种相对性给出的结果比较熟悉了，这种相对性属于狭义相对论讨论的范畴。狭义相对论之所以名字中带有“狭义”，是因为它并没有涵盖物体在加速的情况（这一点后文还会继续介绍）。在一系列事件发生的时候，相对于事件发生地运动的观察者可能会认为这系列事件发生的时间间隔变长了（与静止的观察者相比），这叫作时间延缓。而相对于静止观察者运动的物体，在静止观察者看来长度会变短（与随物体一起运动的观察者相比）。

时间延缓和长度缩短的程度，取决于观察者的速度与光速的比值。因此，只有在相对速度接近光速的时候，这种效应才足以被观测到。而在日常生活中，无论你车开得有多快，街边站着的人都不会注意到你开的车变短了。

相对论的效应多少有些令人不安，你可能更想退回旧的更熟悉的世界观当中去。如果它只在速度接近光速的时候才出现，那它会不会只是一个观念的问题？从某个惯性参考系观察，时间看起来慢了下来，距离看起来缩短了，但是不是实际上时间并没有变慢，距离也并没有真正缩短？

遗憾的是，它们都是真实存在的。时间和空间是相对的，不是绝对的，而我们也不可能确定一个独特的，或者说“正确的”视角，然后给出关于距离和时间的绝对的度量。相对论效应产生的结果是非常实际的。公平来讲，我们还很难通过实验来证实距离的缩短[注]，但我们可以精确地测量出时间的延缓。如果在飞机上放一台原子钟，让它从英国伦敦飞到美国华盛顿特区再飞回来，我们会发现它比一直放置在英国国家物理实验室里的静止的钟慢了1.6×10^{-8}秒。这是因为在飞机两次飞越大西洋的过程中，飞机上的时间延缓了。[注]

这可能很难理解，而且其结果十分令人震惊。年轻的罗韦利意识到，在狭义相对论中，说多个地方同时处于“现在”这个时刻是没有意义的。在很多方面，“现在”只是个幻觉，就好像过去人们认为地面是平的，但这只是以我们的角度无法察觉地面的弯曲所产生的幻觉罢了。如果我们能通过某种方法以十亿分之一秒的精度感知时间，我们就会意识到，说“此时此地”是有意义的，但说事件“此时发生”整个宇宙就没有意义了。[注]尝试建立一套绝对的时间标度，给宇宙中事件发生的时间先后排序，这是注定不可能做到的，就好像在北极点寻找北方一样。

在对相对论产生的这些结果进行了漫长而艰难的思索之后，爱因斯坦于1905年的晚些时候为他关于相对论的论文发表了一篇短小的附录。他将同样的逻辑应用在一个同时发出两道光的物体上。物体发出的两道光方向相反、能量相等，因此不会改变物体的直线运动方向。他推导出，在相对这个物体运动的惯性参考系看来，物体发出的光所带走的总能量要更大一些，就同时间延缓一样。

然而，有一条物理定律规定能量必须永远守恒。能量不可能被创造，也不可能被消灭。因此，如果这个参考系测量到光带走的能量更多，那这些额外的能量是从哪里来的呢？我们可能直觉上会假设这个物体的速度必须减慢，由此失去一部分动能，从而转移给发出的光。但爱因斯坦发现，事情并非如此。他发现，这些能量确实来自物体的动能，但不是物体的速度变慢了，而是物体的质量变小了。物体的质量与能量满足这样一个关系式：$m=E/c^2$。

爱因斯坦得出结论：

如果一个物体以辐射的形式发射出能量E，它的质量就会减少E/c^2。如果我们只说辐射出的能量来自物体本身，听起来就显得太可有可无了，因此我们总结了一个更普遍的结论：物体的质量是它所含能量的量度。(注)

如今的我们可能会直接把这段话的含义表述为这一经典的公式：$E=mc^2$。

在1905年爱因斯坦发表狭义相对论的附录之后，这一理论的简洁性达到了惊人的程度。它并不需要多么复杂的数学计算，但它的意义是极为深远的。学生时期的斯莫林和罗韦利为相对论的逻辑所震惊，也为它得出的结论而着迷。

但如果牛顿在爱因斯坦身后看到这些工作，他或许还是会忍不住露出一丝微笑。

之前提到过，爱因斯坦的狭义相对论之所以称为“狭义”，是因为它只适用于匀速运动的系统，并不适用于带有加速度的系统。尽管我们承认匀速直线运动是相对的，但任何一个坐过过山车的人都会告诉你，加速度是一种可以被实际感受到的东西。皮平在捷影背上时意识不到自己在匀速运动，但如果我们的速度突然发生改变，或者绕着什么东西转

圈，我们就会感觉到。

但加速度是相对于什么而加速的呢？旋转又是相对于什么而旋转的呢？尽管狭义相对论取得了巨大的成功，但爱因斯坦尚未能完全抛弃绝对空间和时间。

不仅如此，牛顿还根据自己得出的运动定律推导出了一条普适的引力定律。牛顿引力定律表明，所有物体之间都有一种吸引力，其大小跟物体的质量成正比，并与物体之间的距离的平方成反比。因此，在引力的表达式中，我们只需要把质量相乘，并除以距离的平方。

牛顿引力定律取得了巨大的成功，但它也有自己的代价。牛顿的引力与他的运动定律里涉及的力有显著的区别：后者是接触性的，它们通常通过对物体的物理接触来起到作用效果，即改变物体的运动状态，比如让物体从静止开始运动。

但牛顿的引力的作用机制则完全不同。引力似乎可以瞬间在两个相隔一定距离的物体之间发生作用，好像是一种神秘的“超距作用”。关于这种作用是如何实现的，物理学家一无所知。牛顿还因为引入了“神秘力量”而遭到了批评。

对此，牛顿自己也毫无办法。在他1713年出版的名扬天下的著作《自然哲学的数学原理》第二版中，他以评注的方式加入了一段一般性的讨论，写道：“我一直未能从引力现象中发现引力性质的成因，也没有形成任何猜想。”[注]

因为牛顿的万有引力被认为是瞬间施加于物体身上的，不管它们之间相隔有多远都是如此，所以这种经典引力观完全违背狭义相对论——狭义相对论认为没有哪种力的传播速度能超过光速。

狭义相对论不适用有加速度的情况，也无法与牛顿引力定律相调

和。爱因斯坦还有很多工作要做。

---

1. Albert Einstein,Relativity: The Special and the General Theory,100th anniversary edition,Princeton University Press,Princeton,NJ,2015,p.155.
2. 捷影（Shadowfax ）是《魔戒》中一匹速度极快的骏马，被甘道夫所驯服，可以长途奔跑无须休息。——译者注
3. 摘自《魔戒三部曲》，邓嘉宛、石中歌、杜蕴慈译，上海人民出版社，2013 。——译者注
4. J.R.R.Tolkein,The Lord of the Rings: The Two Towers,Harper Collins,London,1997,p.586.
5. 这是因为距离缩短的效应出现在20 世纪另一个伟大理论——量子力学所涵盖的尺度上，为避免让读者混淆，我们在这里暂且不提。（如无特别说明，本书页下注均为作者注。）
6. See ‘Einstein’,Metromnia,National Physical Laboratory,Issue 18,Winter 2005.
7. Carlo Rovelli,Reality is Not What it Seems: The Journey to Quantum Gravity,Allen Lane,London,2016,pp.59–60.
8. Albert Einstein,‘Does the Inertia of a Body Depend on its Energy Content?’,Annalen der Physik,18 (1905),639–41.This paper is translated and reproduced in John Stachel (ed.),Einstein’s Miraculous Year: Five Papers that Changed the Face of Physics,centenary edition,Princeton University Press,Princeton,NJ,2005.The quote appears on p.164.
9. Isaac Newton,Mathematical Principles of Natural Philosophy,first American edition,translated by Andrew Motte,published by Daniel Adee,New York,1845,p.506.

第2章 引力不是力

牛顿完全意识到了他理论中关于绝对空间的问题，但他认为加速度（特别是旋转）[注]是可以解决这个问题的秘密武器。为了先发制人，他提出了一个思想实验，表明旋转运动证明了绝对空间的存在，这就是牛顿著名的“水桶实验”。

在《自述》（*Autobiographical Notes*）中，爱因斯坦对此事只是顺便提了一下：“首先要提到的是马赫的论述，虽然牛顿早就清楚地认识到了（指水桶实验）。”[注]

爱因斯坦《狭义与广义相对论浅说》的附录五中并没有提到牛顿的水桶实验，但他认为奥地利人恩斯特·马赫（Ernst Mach）是唯一“认真考虑了如何消除空间概念的物理学家，马赫尝试代之以特定时刻所有质点之间距离的总和（他提出的这个概念，后来成了对惯性的完美的描述）”。[注]

我们可以这样理解牛顿的思想实验：我们将绳子一头系在水桶的把手上，另一头高高地挂在树枝上，这样水桶就悬挂在空中了。往水桶里加3/4容量的水，然后不断旋转水桶，让绳子扭曲，直到绳子扭曲到不能再扭曲了，我们就松手，看看会发生什么（如图3所示）。

绳子开始解旋，水桶开始旋转。一开始，桶中的水仍然保持静止。接着，随着桶旋转速度的增加，桶里的水也开始旋转，水面凹了进去。这是由于旋转运动给水施加了离心力，让水向外运动，因此越靠近桶壁水位就越高。最终，水旋转的速度赶上了桶旋转的速度，水和桶一起旋转。

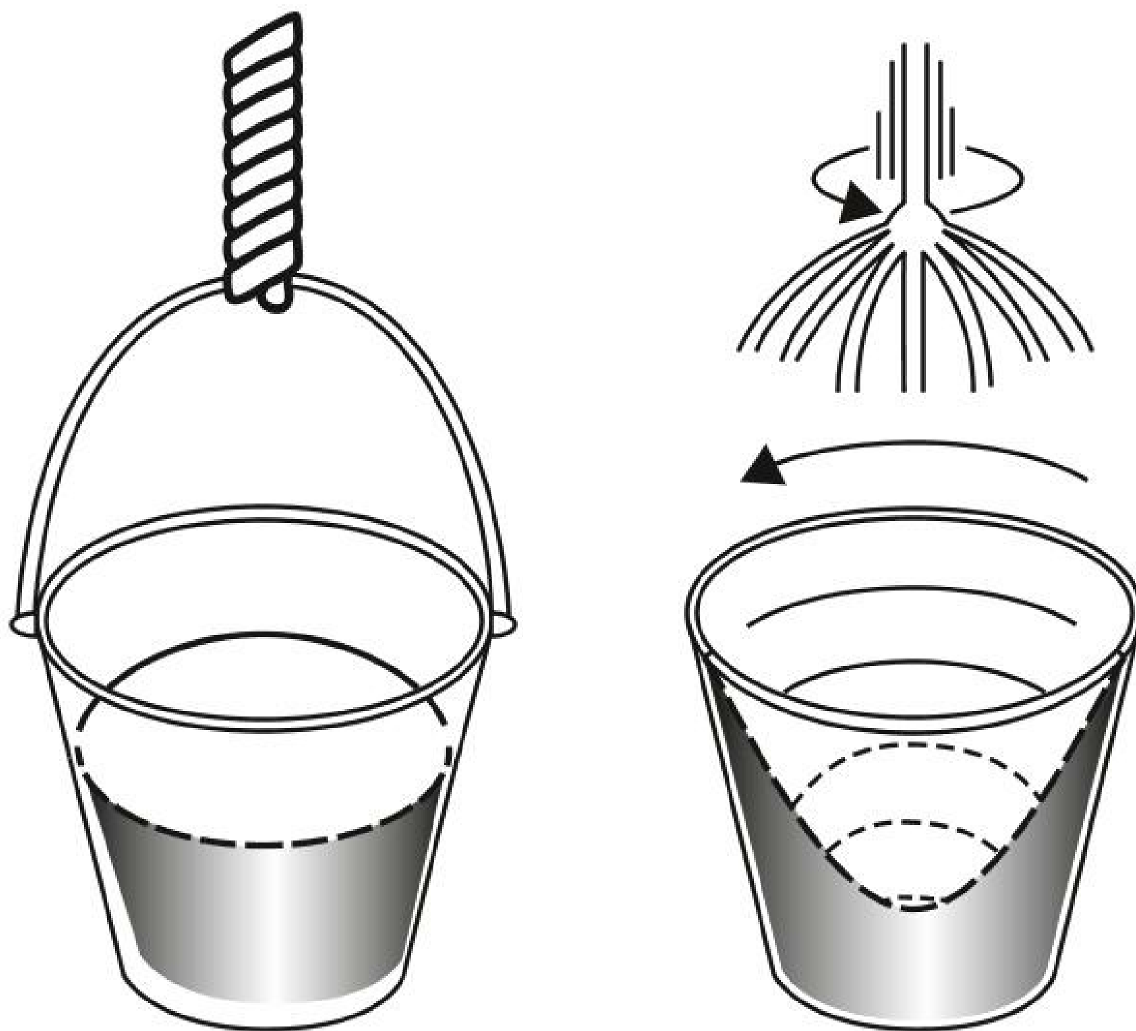


图3 牛顿水桶实验的示意图（随着绳子解旋，桶开始旋转，里面的水被从中心拉向桶壁一侧，呈现凹陷的形状）

在《自然哲学的数学原理》中，牛顿写道：

桶壁一侧水位的上升，表明水会努力向离旋转轴更远的地方运动。这表明，水的旋转运动是真实的、绝对的，而不是相对的。通过这种运动，我们就可以定义并测量绝对运动。注

这是我们日常生活中常见的普遍现象，你可能会觉得它什么都不能证明，更别提证明绝对空间了。但牛顿推理的逻辑是令人信服的。水从内向外移动并沿着桶壁上升的过程显然是一种运动，这种运动要么是绝

对的，要么是相对的。只要水和桶的旋转速度存在差值，水就会继续由内而外，沿着桶壁上升，并且在速度相同时保持这个形状不变。牛顿认为，水的这一行为不能归因于水与桶的相对运动。如果这一运动不是相对的，那它必定是绝对的，而如果存在绝对运动，绝对空间就必然存在。

爱因斯坦意识到了牛顿推理中的逻辑缺陷，但他的反驳需要我们花一点儿力气才能理解。多年以后，人们意识到，牛顿没有纵观全局。桶中水的行为确实不能只由它相对桶的运动来解释，但是可以由它相对于整个宇宙中其他部分的运动来解释。

之前提到过，如果所有的运动（包括旋转）都是相对的，那么我们原则上就不可能通过观察或测量区分是哪个人或者哪个物体在运动。这就是相对运动的含义。如果我们不能区分是桶相对于整个宇宙的其他部分在旋转，还是整个宇宙的其他部分在绕着桶旋转，牛顿的论证就不成立了。

当然，如果是整个宇宙的其他部分绕着静止的桶旋转，就说明这让桶中的水受到了离心力。但我们得思考这是怎么做到的。

爱因斯坦的评论清楚地表明，反驳牛顿的这一观点主要来自物理学家、头号经验主义者马赫，这一观点也被称为马赫原理[注]。为了完全抹除绝对空间的概念，爱因斯坦需要找到一个情境，在这个情境中，正在加速运动的观察者无法分辨出是谁或者什么东西正在加速。

所有在地球上的人都会认为加速度（或者惯性，它衡量的是物体抵抗运动状态变化的倾向）是我们可以直接感受到的，因此是绝对的、无可争辩的。但如果我们是在太空中自由下落呢？

我们不知道爱因斯坦当时正在想什么，但我们知道，在1907年11月那平凡的一天，爱因斯坦在瑞士专利局邂逅了他“一生中最幸福的思想”

[注]。当时的爱因斯坦已晋升为“二级技术专家”。他后来回忆道：“我当时坐在位于伯尔尼的瑞士专利局的椅子上，突然一个想法击中了我：如果一个人自由下落，他将感受不到自己的重量。我大吃一惊，这个简单的思想实验对我产生了极大的影响。”[注]

在自由落体运动中，人既感受不到加速度，也感受不到重力。从这个非常简单的直觉出发，爱因斯坦意识到，我们对于加速度的感觉，与我们对重力（引力）的感觉是完全一样的，它们就是同一件事。爱因斯坦把这条原理称为等效原理。这意味着，解决了加速度的相对性问题，也许可以同时解决牛顿引力的问题。或许，本来待解决的就不是两个不同的问题，而是一个。斯莫林依然记得当年在乘纽约地铁时阅读爱因斯坦1907年发表的关于等效原理的论文的事，他称自己“突然明白了”[注]。

爱因斯坦发现了等效原理，却不知道该拿它来做什么。不管怎么样，到1907年年末，他的生活有了很大的改变。随着他的知名度日益增长，他开启了学术事业，先后在苏黎世和布拉格的大学任教。爱因斯坦承担了很多教学与管理的工作，研究兴趣也转向了其他物理学问题。又过了5年，他才意识到等效原理可以帮助他在另外两件事物间建立联系：引力与几何。

与引力有关的是什么东西的几何形状呢？1908年，爱因斯坦之前在苏黎世理工学院的数学教授赫尔曼·闵可夫斯基（Hermann Minkowski）意识到，可以将空间和时间通过某种方式组合起来，让狭义相对论中的时间延缓和距离缩短效应可以互补，从而产生了四维的时空，人们有时也称之为时空度量。

爱因斯坦后来花了很大力气才证明，这种“四维”的时空观并不是新事物。在牛顿的经典物理学中，日常发生的每一件事都需要4个数才能完全描述：三个空间坐标x、y、z，以及一个时间坐标t。但牛顿物理学把时间当成一个截然不同的量，并相较于空间独立处理。而在闵可夫斯

基的时空中，时间t（单位为秒）与光速c（单位为米每秒）相乘后，ct的单位与空间坐标x、y、z相同（均为米），所以时间与三个空间坐标拥有平等的地位。

如果引力与加速度等效，那么牛顿在伍尔斯索普庄园的花园中被苹果砸到头的经历（广为流传但真实性可疑）就可以从两种不同但等价的角度来看待。我们可以想象引力通过某种方式作用于苹果，将苹果拉向地面，也可以想象地面向上加速以迎接苹果。这两种角度是等效的，但后者只在我们将地球想象成平的时才成立。当然，地球是圆的，我们可不能对地球另一面的人们不管不顾。

爱因斯坦开始意识到，问题在于时空本身。闵可夫斯基时空是平直的欧几里得空间，以古希腊著名数学家欧几里得命名。我们在学校里学到三角形的内角和为180°，圆的周长是其半径的2π倍，两条平行线永不相交，这些都是平直空间的特征。当我们给三维空间加上第四维——时间，就得到了一个平直的时空。

爱因斯坦擅长跳出思维定式来想问题，而且以往他的这种思维方式通常都取得了惊人的效果。如果把地球看成平的，它在穿过平直时空的过程中就能实现加速度与引力的等效性。但我们知道地球表面是个弯曲的球面，所以，如果时空是弯曲的呢？

在平直的时空里，两点之间的最短距离显然是连接两点的线段长度。但伦敦和悉尼之间的最短距离（10553英里[注]）可不是连接两个城市的线段长度。在球面上，这两点之间的最短距离来自一条被称为“大圆弧线”或“测地线”的弯曲路径。

这就是爱因斯坦曾经寻找的答案。在平直空间中，所有线都是直的，因此牛顿的引力必然能瞬间跨过一段距离发生作用。但如果时空是弯曲的，就像大圆弧线一样，那么沿着这条路径运动的物体就是在“自由落体”，在自由落体的过程中，它就获得了加速度。

爱因斯坦伟大的洞察力在于，他想到了时空并不是固定不变的，而是可塑的。就像磁场的“力线”一样，时空可以根据质能的存在这样或那样地弯曲。一个像恒星那样的大型物体会弯曲它周围的时空（如图4所示），就好像一个小孩在蹦床上跳来跳去时会改变蹦床表面的形状一样。其他物体，例如行星，一旦离恒星过近，就会沿着时空形状所决定的最短路径运动。沿着最短路径做自由落体运动的行星就获得了加速度，这与行星受到引力而获得加速度是完全等价的。

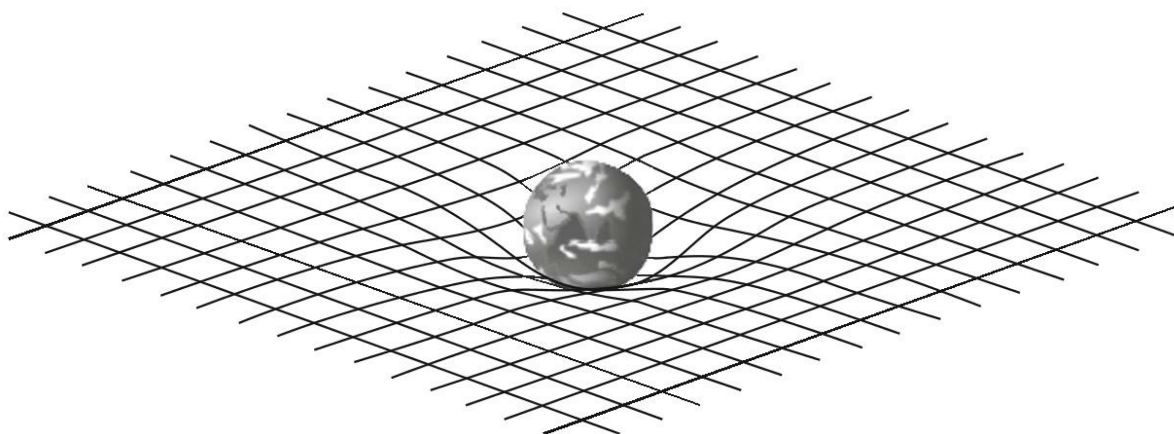


图4 一个有着较大质能的物体，例如地球，会让它周围的时空弯曲

掉落的苹果并不必须被看作是某种神秘的超距作用力从地底下凭空而起将其拽落，它也可以被看作是愉快地沿着地球质量造成的弯曲时空给出的最短路径，一路加速而落地。

1952年5月，普林斯顿大学的美国理论物理学家约翰·惠勒（John Wheeler）从书架上拿下一个装订精致的全新笔记本，并给它写上“相对论Ⅰ”的标签。他很满意学校同意他教一门关于相对论的课程，并且想通过撰写一本教材来好好研究一下这个课题。“那年秋天，有15名研究生选了我的这门课，”惠勒说，“这是普林斯顿大学第一次开设相对论的课程。我和学生一起深入研究了这个课题，尝试透过已经主导该理论数十年的数学形式，寻找真正的、触手可及的物理意义。”㊟

这本书最终于1973年出版，题为《引力论》（*Gravitation*），由惠

勒与查尔斯·米斯纳（Charles Misner）和基普·索恩（Kip Thorne）合著。在罕布什尔学院读大学的第一年，斯莫林参加了人生中的第一次科学会议——两年一度的得克萨斯相对论天体物理学专题讨论会系列中的一场，在纽约市举行。在会上，他遇到了牛津大学的数学物理学家罗杰·彭罗斯（Roger Penrose），还听了史蒂芬·霍金和美国理论物理学家布赖斯·德威特（Bryce DeWitt）的报告。斯莫林也遇到了索恩，索恩建议他弄到这本新出版的《引力论》并认真吃透它。虽然这本书并不是大学课程要求的教材，但在接下来的一年里斯莫林还是对着它仔细研读。

这本书注定成为一本极有影响力的教材。它有近1 300页，厚厚的一大本，非常适合帮助思维方式较为实际的学生掌握引力的图像——如果它沿着时空的弯曲掉落，着地的时候会发出重重的一声闷响。

在找到合适的措辞之后，惠勒在几年后总结了爱因斯坦的相对论：“时空告诉物质如何运动，物质告诉时空如何弯曲。”[注]

借助这样的洞察力，爱因斯坦发现了可以同时解决加速度和引力问题的理论，即后来我们所说的广义相对论。广义相对论表明，引力这种东西并不存在。质能产生引力场，但引力场并不与磁场类似：它不是存在于时空中每一点的某种东西。引力场本身就是时空。

想法已经有了，但爱因斯坦需要找到一种方法用数学的语言把它表达出来。把想法转化成数学公式总是困难的，研究四维空间中的物理学则格外困难，但爱因斯坦急需一套方程组来解释所有种类的时空几何形状。他的理论需要适应各种各样的时空，而它们的坐标方向可能各不相同。

爱因斯坦进一步提出了两条原理来推进自己的研究。其一是广义协变性，其本质上是相对性原理的延伸，保证物理学定律与参考系的选择完全无关——不管是惯性系还是有加速度的非惯性系都是如此，因此也与坐标系的选择无关。[注]

第二条原理叫作一致性原理。爱因斯坦承认，牛顿万有引力定律的精度在它的适用范围内是完全没有问题的，因此他要求引力场方程能在极限条件下导出牛顿引力定律，即空间平直、速度远低于光速的条件下。

有一种广泛的误解认为，爱因斯坦是一位天才的物理学家，也必定是一名优秀的数学家，然而他并不是。他在将广义相对论的思想数学化时遇到了困难，并求助于朋友马塞尔·格罗斯曼（Marcel Grossman），格罗斯曼向他介绍了伟大的德国数学家卡尔·弗里德里希·高斯（Carl Friedrich Gauss）及其学生伯恩哈德·黎曼（Bernhard Riemann）的工作。爱因斯坦接触到了黎曼的曲率张量，这是描述任意坐标系下一般几何形状曲率的标准数学表达方式。正是这一联系，后来让16岁的斯莫林的兴趣从建筑转向了广义相对论。

但黎曼张量并不能很好地满足爱因斯坦的要求。而且，在努力总结广义相对论的数学形式的过程中，爱因斯坦被艰深复杂的代数形式搞迷糊了。在两年间，他犯了各种各样的错误，尝试走了很多条路，但每条通往的都是死胡同。

最终，爱因斯坦还是找到了能描述引力场，并满足他对物理学原理的所有需求的数学形式。其结果是一系列方程，将时空的弯曲（位于方程左侧）与质能的分布和流动（位于方程右侧）联系了起来。他在位于柏林的普鲁士科学院做了四场讲座（最后一场在1915年11月25日举行），将自己的这一系列方程公之于众。

从开始构思到最终得到广义相对论的引力场方程为止，爱因斯坦想出了四种手段以验证这一理论。

第一种与其说是验证手段，不如说是对已有疑难问题的解决。从约翰内斯·开普勒（Johannes Kepler）17世纪提出开普勒三定律时我们就知道，行星围绕太阳运行的轨道呈椭圆形。但行星轨道并不是完美的椭圆

——如果是那样的话，行星轨道上距离太阳最近的那个点（近日点）应该是固定不动的，行星每绕一圈时都在这个位置离太阳最近。然而，天文观测表明，行星每运行一周时，近日点都会产生微小的偏移，这种现象被称为进动。

天文学家观测到的进动，一大部分可以用太阳系中其他行星的引力总和来解释，这是牛顿定律完全可以解释的现象。对于离太阳最近的水星来说，牛顿力学预言的进动为每世纪532角秒[注]。然而，实际观测到的进动值要更大一些，大约为每世纪574角秒，两者相差42角秒。这个差值虽然很小，但它意味着每300万年水星都要多转一圈。

牛顿力学无法解释这一差异，有人提出了其他解释，比如在水星轨道的内侧还存在一颗离太阳更近的行星，称为祝融星（Vulcan），天文学家苦苦找寻它无果。爱因斯坦高兴地发现，用场方程计算出来的相对论效应，刚好贡献了每世纪43角秒的差值，这是因为水星离太阳太近，受到了太阳周围时空弯曲的影响。[注]这一发现让爱因斯坦获得了一生中在科学上所获得的最强烈的情绪体验：“一连几天，我都因喜悦和激动而发狂。”[注]

或许广义相对论最著名的预言还要数星光在经过太阳时的弯曲。和水星的进动一样，星光弯曲本身并不是一个新的预言，但广义相对论预言的是弯曲的程度。牛顿的引力定律表明经过太阳表面的光应该弯曲0.85角秒[注]，但广义相对论的时空弯曲预言的数值是它的两倍——1.7角秒。与水星进动不同，没有人测量过星光从太阳旁边经过时弯曲的程度，因此这会是一场直接的检验。

众所周知，爱因斯坦的预言由英国天体物理学家阿瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）带领的一个团队于1919年5月验证。他们在日全食期间测量了多个恒星发出、经过太阳再到达地球的光。尽管几乎没有人真正理解时空弯曲真正的含义（其中更是几乎没有人能看得懂抽象的张

量数学，哪怕专业的物理学家中也没有几个人能懂），但时空弯曲的概念激发了大众的想象力，爱因斯坦一夜成名。

广义相对论还预言了弯曲时空带来的类似狭义相对论的效应，爱因斯坦在1911年就计算出了个中细节。他推导出，在大型物体附近，即时空弯曲得最厉害的地方，测量到的时间会延缓，距离也会收缩。一个放置于地球表面的标准钟会比在地球上空的轨道上飞行的钟走得慢。

我们在上一章中了解：如果把一台原子钟放在飞机上，从英国伦敦运到美国华盛顿特区再运回来，它就会比一直静止地放在英国国家物理实验室的钟慢1.6×10^{-8}秒。这种时间延缓是飞机的速度带来的，属于狭义相对论的效应。但这台钟在高于海平面10千米的空中飞行时受到的重力要比地面小，即时空弯曲程度小，因此广义相对论效应会使它再慢5.3×10^{-8}秒。经过一些几何学上的调整之后，最终理论预测钟会慢4.0×10^{-8}秒。2005年，科学家进行了这一实验，测得钟慢了（3.9 ± 0.2）$\times10^{-8}$秒。[注]

你可能会觉得千万分之一秒的误差对于我们地球上的日常生活而言根本不值一提，但如果不修正狭义和广义相对论带来的微弱效应，你的智能手机应用软件、车载导航、船或飞机上用的全球定位系统（GPS）的误差很快就会开始积累，仅在一天内就会造成11千米的定位误差。[注]绘制你的跑步或骑车路线图将会很困难，在海上的船和在空中的飞机也都要迷路了。

爱因斯坦的场方程极为复杂，以至于爱因斯坦本人都认为它们不可能在不做简化近似的条件下被精确求解。然而，才不到一年，德国数学家卡尔·施瓦西（Karl Schwarzschild）就得出了一组解。施瓦西的解描述了一类大的、不带电的、非旋转的球形物体，可以作为缓慢旋转的天体（如恒星和行星）的有效近似。斯莫林在进入罕布什尔学院不久后就选了施瓦西解作为口头汇报的课题，结果事实证明他高估了自己的能力，

理解上的不足很快就暴露了出来，最后他这门课没能及格[注]。

施瓦西解最惊人的特征之一是它们预言了一道基本的边界，被称为施瓦西半径。任何被压缩到半径小于其施瓦西半径的物体都会达到极大的密度，以至于它周围的时空被弯曲到落回自身（地球的施瓦西半径约为9毫米）。没有任何事物能够逃出这类物体的引力场，连光都不行。这类物体就是黑洞[注]。

罗韦利在多年后写道："当我还在读大学的时候，黑洞被认为是一种晦涩难懂的理论所预言的难以想象的可能的结果。而如今，天文学家已经观测到成百上千个黑洞，并且开始研究它的细节了。"[注]尽管黑洞显然难以直接探测到，但如今有大量间接证据表明，这种东西在我们的宇宙里存在得相当普遍，而且或许每个星系的中心都有特大质量黑洞。

爱因斯坦对于黑洞的想法表现得较为冷静，但1916年6月他推测，引力场的小波动会在时空中形成波并向外传播，就像湖面的水波一样。[注]这类引力波与光波截然不同，只能在两个大质量天体相互绕转（天文学家称之为双星系统）的情况下产生。直到20世纪五六十年代，物理学家才意识到他们有机会实实在在地探测到引力波，而在2015年9月15日，他们的耐心终于得到了回报。

2015年9月15日，一个叫LIGO的合作实验组织观测到了两个黑洞并合时发出的引力波。LIGO包含两座观测台，一座位于美国路易斯安那州的利文斯顿，另一座位于华盛顿州里奇兰附近的汉福德，几乎位于美国本土的对角线两端。LIGO的观测结果于2016年2月11日公布，从那时候开始，LIGO和位于意大利比萨的天文台Virgo一起，继续记录下了一些引力波事件，其中包括两个中子星并合的事件。2017年诺贝尔物理学奖颁给了美国物理学家巴里·巴里什（Barry Barish）、基普·索恩和雷纳·韦斯（Rainer Weiss），以表彰他们对LIGO和引力波观测做出的贡献。

成功探测到引力波不仅强有力地证明了广义相对论的正确性，也打开了探索宇宙中遥远事件的新窗口，我们无须依赖光或其他形式的电磁辐射就可以知道发生了什么。

当爱因斯坦在普鲁士科学院做关于广义相对论的系列讲座的最后一场时，他相信自己已经完全解决了绝对空间和时间的问题。他写道：“（广义相对论的广义协变原理）将物理客观性的最后一片遗迹从时间和空间中消除了。”[注]因此，他宣布，绝对时空观失败了，相对论胜利了。

让我们回到马赫原理，如果牛顿的桶是静止的，而宇宙其他部分围绕它旋转，那是什么造成了把水沿着桶壁向上推的离心力呢？

答案会让你惊叹不已。我们认为静态的水之所以会随着桶转动起来，是因为整个宇宙的质能一起拽动了它周围的时空。这一效应在1918年由奥地利物理学家约瑟夫·伦泽（Josef Lense）和汉斯·蒂林（Hans Thirring）由广义相对论导出，被称为参考系拖曳（framedragging），又称伦泽–蒂林效应。参考系拖曳效应告诉我们，我们确实不可能通过测量来区分到底是水在静态的宇宙中旋转，还是整个宇宙绕着在桶中静止的水旋转。水的旋转运动是相对的。

2004年4月24日，一座被称为引力探测器B（Gravity Probe B）的极为精密的设备被发送到了极地轨道上。这颗卫星上搭载了4台陀螺仪，在卫星绕地球旋转的过程中，科学家密切监测着陀螺仪的方向，并观察到了两种效应。地球使其周边的时空发生弯曲，根据预测，这将使引力探测器B上的陀螺仪在绕地球轨道平面上（即南北方向）发生6 606毫角秒[注]/年的进动。这一进动被称为测地漂移（geodetic drift），该现象由荷兰物理学家威廉·德西特（Willem de Sitter）在1916年发现。

第二种效应就是参考系拖曳。随着地球绕着地轴旋转，它沿着东西方向（垂直于引力探测器B的轨道平面）拖动了周围的时空，这会让引

力探测器B上的陀螺仪产生第二种进动，据预测应为39.2毫角秒/年。

数据采集从2004年8月开始，大约一年之后结束。该项目遭遇了一场令人失望的意外：由于发生了此前未曾预料到的静电荷的累积，卫星上的陀螺仪产生了令人意想不到的大幅摆动。这项误差可以用一套精细的数学模型来校正，但代价是增加了最终实验结果的不确定度。

对数据的分析持续了5年。2011年5月4日，研究人员在一场新闻发布会上公布了实验结果：测地漂移为6 602±18毫角秒/年，参考系拖曳在东西方向上产生的漂移为37.2±7.2毫角秒/年。后者的不确定度如此大，正是校正陀螺仪摆动的数学模型带来的。

尽管不确定度较大，但这一实验结果也为广义相对论增添了一项有力的证据。

对于20世纪70年代末学习相对论的学生而言，有很多验证相对论的经验证据还没有出现。但哪怕是最叛逆的学生，都不会质疑相对论本质上的正确性。诚然，这一理论的确复杂，它使用的数学语言只有很少的一部分人才有能力理解，但它在概念上的优美性或许在整个物理学史上都是无可匹敌的。相对论仿佛会施魔法，斯莫林和罗韦利都被它迷住了。"它是通往真实的一瞥。或者说，它就是对真实的一瞥，比我们日常看到的模糊而平庸的景象更为清晰。透过它看到的世界与我们梦中的世界有着同样的组成，但比我们梦中模糊的世界更加真实。"(注)

爱因斯坦做出了"时空是相对的"这一成功论断。时空本身即由物质和能量组成。如果把所有的物质和能量都从宇宙中拿出去，并不会剩下一个空空的容器，而是什么都没有了。

世间存在的所有东西，都在宇宙里了。

---

1. 加速度指速度随时间的变化率。我们自然而然地认为速度的变化是指速度大小的变

化（比如汽车启动时速度从零增加到近100 千米每小时），但速度是一个矢量——它不仅有大小，也有方向。如果我们保持速度大小不变，但快速地改变它的方向，仍然会产生加速度。旋转运动就是一种特殊的加速运动，因为正在旋转的物体的速度方向在不断改变。

2. Albert Einstein,in Paul Arthur Schilpp (ed.),Albert Einstein:Philosopher-Scientist,Harper & Row,New York,1959,p.27.

3. Albert Einstein,Relativity: The Special and the General Theory,100th anniversary edition,Princeton University Press,Princeton,NJ,2015,pp.163–4.

4. Isaac Newton,Mathematical Principles of Natural Philosophy,first American edition,translated by Andrew Motte,published by Daniel Adee,New York,1845,p.81.

5. Einstein was forever indebted to Mach for his approach to physics,but not his aggressively empiricist approach to philosophy,which among other things led him reject the existence of atoms.Einstein once commented that ‘Mach was as good at mechanics as he was wretched at philosophy’.Albert Einstein,quoted in Abraham Pais,Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein,Oxford University Press,Oxford,1982.The quote appears on p.283.

6. Albert Einstein,in the ‘Morgan manuscript’,quoted ibid.,p.178.

7. Albert Einstein,‘How I Created the Theory of Relativity’,lecture delivered at Kyoto University,14 December 1922,translated by Yoshimasa A.Ono,Physics Today,August 1982,p.47.

8. Lee Smolin,personal communication,7 September 2017.

9. 1英里≈ 1.61 千米。——编者注

10. John Wheeler,with Kenneth Ford,Geons,Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics,W.W.Norton,New York,1998,p.228.

11. Ibid.,p.235.

12. “协变”（covariance）这一概念在之后的章节中会十分重要，但它对于读者来说或许还很陌生。需要记住的是，这一概念完全是为了保证背后的物理学定律不受坐标系任意改变的影响。打个比方，如果我们将坐标轴的单位从米改成千米（相当于乘1000），像速度这种物理量的大小就需要除以1000——1000米/秒变成了1千米/秒。因此，速度就是一个逆变矢量，比例尺扩大以后这类量会等比例缩小，反之亦然。而协变矢量的一个例子是梯度。例如，0.001摄氏度/米的梯度在坐标轴单位从米变成千米以后，就变成了1摄氏度/ 千米。在比例尺扩大以后，协变矢量会等比例扩大。

13. 一整个圆周是360度，1度的1/60是1角分，1角分的1/60是1角秒。因此，532角秒约为1度的15% 。

14. 其他行星的近日点也受到了时空弯曲的影响，但这些行星离太阳较远，因此时空弯曲产生的影响要小得多。

15. Albert Einstein,letter to Paul Ehrenfest,17 January 1916,quoted in Robert E.Kennedy,A Student’s Guide to Einstein’s Major Papers,Oxford University Press,Oxford,2012.The quote appears on p.214.

16. 牛顿对光的本质持有微粒说，即认为光是由单个粒子所组成的。由此，这种一个一个的光的“子弹”在经过恒星这样的大质量物体时受到引力影响而改变路线也就不难想象了。

17. ‘Einstein’,Metromnia,National Physical Laboratory,Issue 18,Winter 2005,p.3.

18. Neil Ashby,‘Relativity and the Global Positioning System’,Physics Today,May 2002,p.42.

19. Lee Smolin,personal communication,7 September 2017.

20. “黑洞”（black hole ）的名字是由惠勒推广开的，虽然不是由他创造的。

21. Carlo Rovelli,Reality is Not What it Seems: The Journey to Quantum Gravity,Allen Lane,London,2016,p.71.

22. 爱因斯坦在这篇论文里犯了一个重大错误，他在两年后纠正了过来。

23. Albert Einstein,in A.J.Knox,Martin J.Klein,and Robert Schulmann(eds),The Collected Papers of Albert Einstein,vol.6,The Berlin Years: Writings 1914–1917,Princeton University Press,Princeton,NJ,1996,p.153.

24. 1毫角秒为1角秒的1/1000 。

25. Rovelli,Reality is Not What it Seems,p.73.

第3章 为什么没有人理解量子力学

20世纪物理学领域的革命不止一个，还有另一个。爱因斯坦的狭义相对论和广义相对论告诉了我们关于空间和时间本质的新知识，并且把物质和能量联系在一起，给我们带来了质能这一概念。然而，虽然爱因斯坦最出名的方程 $E=mc^2$有着令人吃惊的含义，质能又在弯曲的时空中起着如此重要的作用，但这一公式里的物理关系仍然是“经典的”。对于相对论适用的情况而言，时空之内的东西——物质（由“粒子”一样的东西组成）和辐射（由“波”一样的东西组成）的行为，与牛顿、麦克斯韦及他们同时代的人所设想的并无差别。

之所以这么说，是因为20世纪物理学的第二场革命彻底地改变了我们对物质与辐射的本质、它们与能量的关系，以及$E=mc^2$中的m的含义的理解。这场革命给我们带来了量子力学。

如今，学生眼中的量子力学通常显得枯燥无味、平平淡淡，是一套已经被人们广为接受的理论，为众多坚实的经验证据所支持。老师告诉学生大自然的本质就是如此，你只需要接受它就好了。学生们学到各种数学上的惯常处理方式，以此应用这一理论（至少用来正确地解答考试题），而无须理解这些数学处理方式是从哪里来的，又为何拥有这样的形式。

量子理论的早期历史通常会在学期第一节课开头的几分钟内就被交代完毕。学生会知道马克斯·普朗克（Max Planck）在“不得已而为之”的情况下提出电磁辐射表现得像一捆一捆的离散的能量包，他称之为“能量子”（quanta）；他们会学到爱因斯坦的光量子假说：爱因斯坦勇敢地（在他那个时代，甚至可以称得上是莽撞地）提出，光本身就由离散的光量子（如今我们称之为“光子”）组成。也就是说，引领量子革命的不

是普朗克，而是爱因斯坦。

学生会学到，尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）利用量子的思想来描述氢原子中电子围绕原子核（质子）的运动。在这种旧的“行星”原子模型中，电子会在吸收光或发射光的同时从一条轨道“跳跃”到另一条轨道上，这一过程可以体现在光谱中线的排列模式上，“跳跃”的能量越大，光谱线排列得就越紧密。

学生会学到路易·德布罗意（Louis de Broglie）提出的大胆假设：如果电磁波会表现得像粒子一样（光量子），那或许粒子也会表现得像波一样，体现出一种“波粒二象性”。他们还会学到埃尔温·薛定谔（Erwin Schrödinger）优美的波动力学理论导出的氢原子轨道，以及马克斯·玻恩（Max Born）认为电子波是量子概率波的诠释。他们会学到维尔纳·海森堡（Werner Heisenberg）的不确定性原理；学到保罗·狄拉克（Paul Dirac）将量子力学与狭义相对论成功地结合，产生的新理论可以解释令人困惑的电子自旋问题，还预测了反物质的存在，其与普通物质只有电荷相反，其他所有性质都相同。

但还有很多东西是他们不会学到的。许多学生不会知道，物理学家在无休止地争论量子理论对于我们理解物理现实而言到底有什么意义的过程中，感受到了怎样的挫败、痛苦，甚至流下过多少苦涩的眼泪（是的，眼泪）。

他们不知道薛定谔坚持认为“量子跃迁的想法整个就是胡说八道”[注]，也不知道玻尔和海森堡就对不确定性原理的诠释曾有过剑拔弩张的争论。有些学生可能听说过爱因斯坦的名言“上帝不掷骰子”[注]，但不知道他是在与玻尔对量子概率的诠释，以及量子理论的一致性和完备性的争论中说出这句名言的，这场争论可以说是整个科学史中最伟大的论战之一。

他们也不知道爱因斯坦和薛定谔之间的一系列通信，这些信件最终

孕育并产生了著名的“薛定谔的猫”悖论；更不知道这个悖论本来是用来半开玩笑地嘲笑玻尔、海森堡和沃尔夫冈·泡利（Wolfgang Pauli）提出的量子理论正统诠释带来的荒谬结果的。

学生们都不知道这些，让我感到很遗憾。对于头脑中经典力学的影响已根深蒂固的学生而言，学习量子力学的概念会破坏他们原本坚实的观念。因此，不那么开明或者不尊重量子力学发展史的教师会让学生直接放下对基本概念的疑问，只关注如何利用量子力学做一些计算。

狄拉克于1930年出版的《量子力学原理》（*Principles of Quantum Mechanics*），就是这种“工具主义者”态度的体现。从很多方面看，狄拉克都是一个相当特立独行的人。尽管他在量子力学发展过程中取得了许多突破性的成就，但他首先是一位数学家，其次才是一位物理学家。这一点也清晰地体现在他的这本经典教材中，他使用了“符号的方法，直接以抽象的方式处理重要的基本物理量”，并且“迫使学习者完全脱离量子力学的发展时间顺序”。[注]

狄拉克痴迷于方法论和数学形式。他轻视哲学，认为这是一门“讨论已有的发现的学科”，暗指哲学本身无法带来新的发现。[注]在玻尔、爱因斯坦、海森堡和其他物理学家争论量子力学的诠释时，狄拉克对这种哲学上的“吹毛求疵”不为所动：“在我看来，一名数学物理学家工作的基础是得到正确的方程……如何诠释这些方程是次要的。”[注]他乐于把关于诠释的争辩都留给别人。

要学会量子力学的所有这些数学处理已经够难的了，而如果量子力学看起来非常奇怪、令人难以理解，也许你需要首先记住：量子理论是正确的，毋庸置疑（至少就像科学中其他正确的理论一样）。无论如何，它都是大部分当代物理学、相当一部分化学，以及整个当代电子技术的基础。

好学生都是这么做的。李·斯莫林在罕布什尔学院学习的第一年，

就学了狄拉克写的教材。卡洛·罗韦利接触这本教材的途径要更曲折一些。在一门关于物理学中的数学方法的课上，老师让他们找一个课程中没介绍过的课题，研究后向班里其他同学做一个报告。罗韦利选择的课题是“量子力学的应用”，老师建议他给大家讲这个。罗韦利小心翼翼地说：“选这门课的同学都还没上过量子力学的课呢。”[注]没想到老师对罗韦利说：“那又怎么样？你现学一下量子力学不就行了！”

于是，罗韦利找到狄拉克的经典教材，以及五六本其他的书，开始埋头苦学。两个星期以后他找到老师，宣布：“我学完量子力学了。”老师很惊讶，解释说他之前说“现学一下”是在开玩笑，没想到罗韦利真的在两周内自学了量子力学。

好的学生会接受量子力学的数学形式在表面上的价值，用它埋头苦算。但对于其中一部分学生而言，深层的不安从未消失。极富魅力的美国物理学家理查德·费曼（Richard Feynman）有一次有感而发：“我想我可以有把握地说，没有人理解量子力学。”[注]他的这句话或许并不难理解。

对于第一次接触量子力学的人来说，或许很难搞明白量子力学是在讲什么。为了了解为什么哪怕是诺奖得主对这门学科在研究什么都难以达成共识，我们可以先从一个简单的现象开始，这个现象叫作双缝干涉（double-slit interference）。在《费曼物理学讲义》（*The Feynman Lectures on Physics*）中，费曼解释道：“我们选择这样一个现象来研究，这个现象不可能且绝对不可能通过任何经典的方式来理解……在现实中，它包含着一个唯一的谜团。我们不可能通过解释把谜团赶走。”[注]

双缝干涉现象在19世纪初被物理学家发现。它的过程是这样的：我们首先生成一束单色光或接近单色的光，让它通过一块金属板上面的狭缝——其宽度与光波长的数量级相当，通过狭缝之后光会散开，物理学家将这一现象称为衍射（diffraction）。通过狭缝的光投射在远处的一

个光屏或照相底片上，我们会看到光投射出的形状不是一条清晰的、与狭缝一样粗的线，而是更宽、边缘也更模糊的条带。

现在，我们让光通过两道互相平行的狭缝，通过两道狭缝之后的光都会衍射，叠加在一起形成一种明暗交替的直线条纹，这被称为干涉条纹（见图5）。这种现象首次被发现时，为光的波动说（即认为光是一种波的理论）提供了强有力的证据。波在通过狭缝并发生衍射的时候边缘会弯曲，而通过两道平行狭缝并各自衍射的波会相遇并重叠，在波峰遇到波峰的地方就发生相长干涉——两道波互相加强，形成一道更高的波峰，即出现明亮的条纹；在波峰遇到波谷的地方就发生相消干涉——两道波互相抵消，形成暗纹。

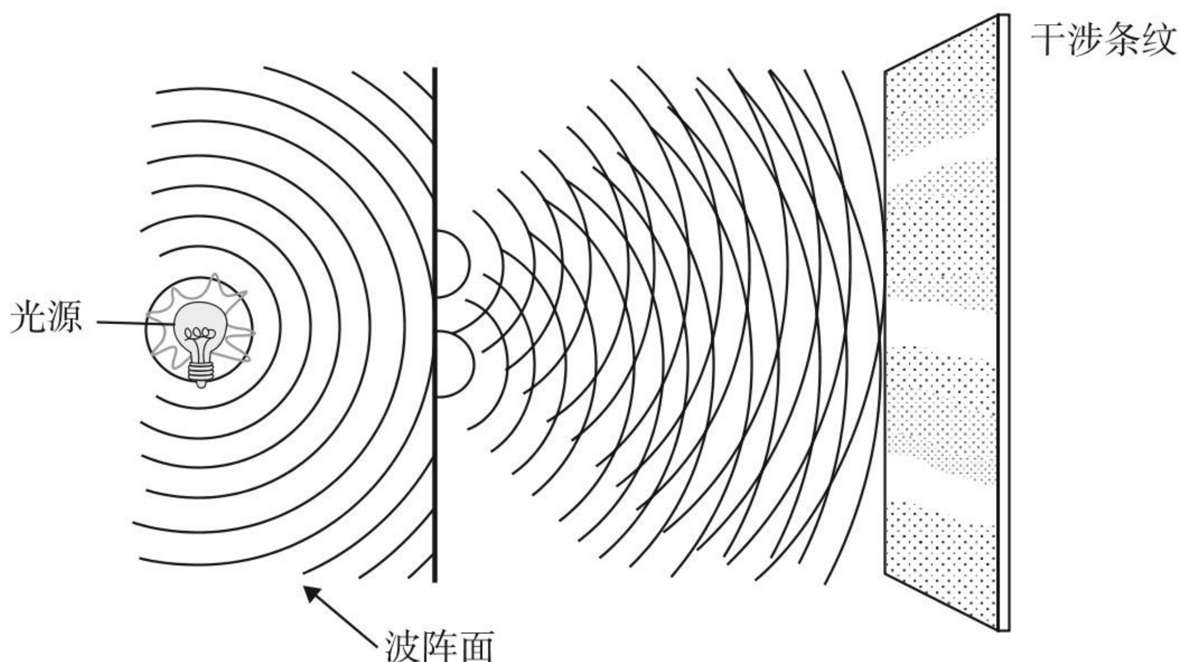


图5 单色光在通过两个相互接近的小孔或狭缝时，会产生一系列明暗相间的条纹。这种条纹可以通过光的波动说轻易地解释清楚，即重叠的波分别发生相长干涉（产生亮纹）和相消干涉（产生暗纹）

只有波的性质才能解释这种现象。

这一切看起来都很合理，但1905年爱因斯坦提出，光可能最终是由“粒子”（光量子）组成的。也就是说，光以某种方式既表现为粒子，

又表现为波。1923年，法国物理学家路易·德布罗意更进了一步，提出小的物质粒子（如电子）或许也可以表现出波的行为。就像对光所做的实验一样，我们可以准备一束电子（类似老式电视机显像管中的电子束），让它通过相互接近的狭窄双缝，这样一来会发生什么呢？

我们的直觉可能会认为，电子束中的电子要么通过这条狭缝，要么通过那条狭缝，从而在屏上产生两条线，分别对应于两条狭缝。我们还会预测线的中间最明亮，显示这里投射的电子最多；而周围稍稍弥散，这是一部分电子擦过狭缝的边缘并发生散射形成的。

但科学家做了实验以后，发现实际结果并不是这样的。屏上显示的并不是电子沿直线穿过两条缝而产生的两条明亮的线，而是类似波干涉形成的双缝干涉条纹。德布罗意是对的。

也许这会让我们抓耳挠腮、百思不得其解，只能耸耸肩表示无能为力，但我们再进一步延伸一下这个实验会怎么样呢？如果我们降低电子束射出电子的强度，使得每次刚好只射出一个电子，会发生什么呢？

乍一看，这一条件好像又回到了我们熟悉的情况。每个电子会在屏幕上留下一个亮点，告诉大家“一个电子打在了这里”。我们可能会松一口气：这下子电子总该是粒子了吧。它们一个一个地穿过狭缝，以看似随机的方式打在屏上。

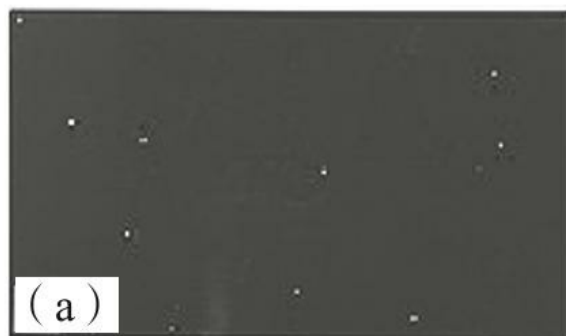
然而，形成的条纹并不是随机的。随着越来越多的电子穿过狭缝打在屏上，我们会看到一个又一个的亮点聚集成群、互相重叠、互相合并（见图6），最终形成了栅栏一般明暗相间的条纹——我们再次得到了双缝干涉条纹。

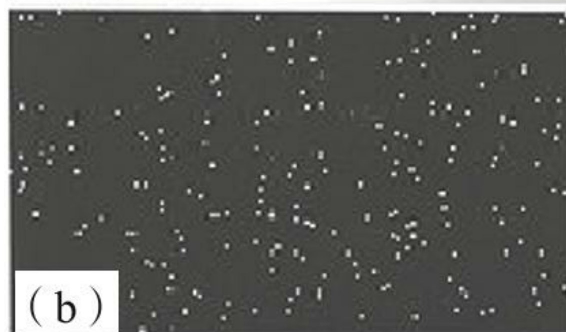
现在，我们面临一个选择。我们可以假设这种波的行为来自某种类型的统计平均。这种诠释认为，每个电子作为一个独立的基本粒子，要么穿过这条狭缝，要么穿过那条狭缝（这很符合逻辑）。这样，我们就

得假设有某种未知的机制掌管着电子的行为，让它更容易出现在亮纹区域。如果我们堵住其中一条狭缝，或是尝试探测电子到底穿过了哪条狭缝，我们很快就会发现干涉条纹消失了，屏上的图案回到了电子沿直线运动产生的图案。因此，不管决定通过双缝的电子行为背后的机制是什么样的，它都必定在某种程度上依赖于电子没有通过的那条狭缝，这太奇怪了。

或者，我们可以假设电子的波动性是一种内禀的性质：每个电子自身就具有波的行为，同时通过了两条狭缝，自己与自己发生了干涉。

如果现在这个诠释就已经让你有点儿不舒服了，那接下来的事情更会让你大跌眼镜。


(a)


(b)


(c)


(d)


(e)

图6 我们可以让电子一个接一个地通过双缝实验设备，用胶片记录下它们依次打出来的位置。胶片（a）到（e）分别展示了探测到10个、100个、3000个、20000个，以及70000个电子位置的胶片

想象一道“电子波”同时穿过两条狭缝，自己与自己发生干涉，然后打在了屏上。我们知道，如果是一道波，在干涉之后会形成有峰有谷的波浪，留下有明有暗的干涉条纹。而问题在于，波从本质上讲是分布在整个空间里的，它是非局域性的。但我们知道，电子最终打在屏幕上只会形成一个小亮点，它是局域性的。

为了理解这一点，我们必须引入玻恩关于电子波的概率诠释。我们认为，电子波代表的是在任意一个点找到这个电子的概率。因此，电子波的波峰和波谷可以被解读成一种量子概率上的干涉条纹：在亮纹中找到电子的概率较高；在暗纹中找到电子的概率较低，甚至为0。

不过，这种诠释有一个问题。在电子打到屏上的一刻，电子原则上可以出现在量子概率大于0的任意一点，但它最终只能出现在一个位置。通过某种方式，电子从“可以在这里，也可以在那里，可以在绝大多数地方”变成了“就在这里”。这个过程被称为波函数的坍缩（见图7）。

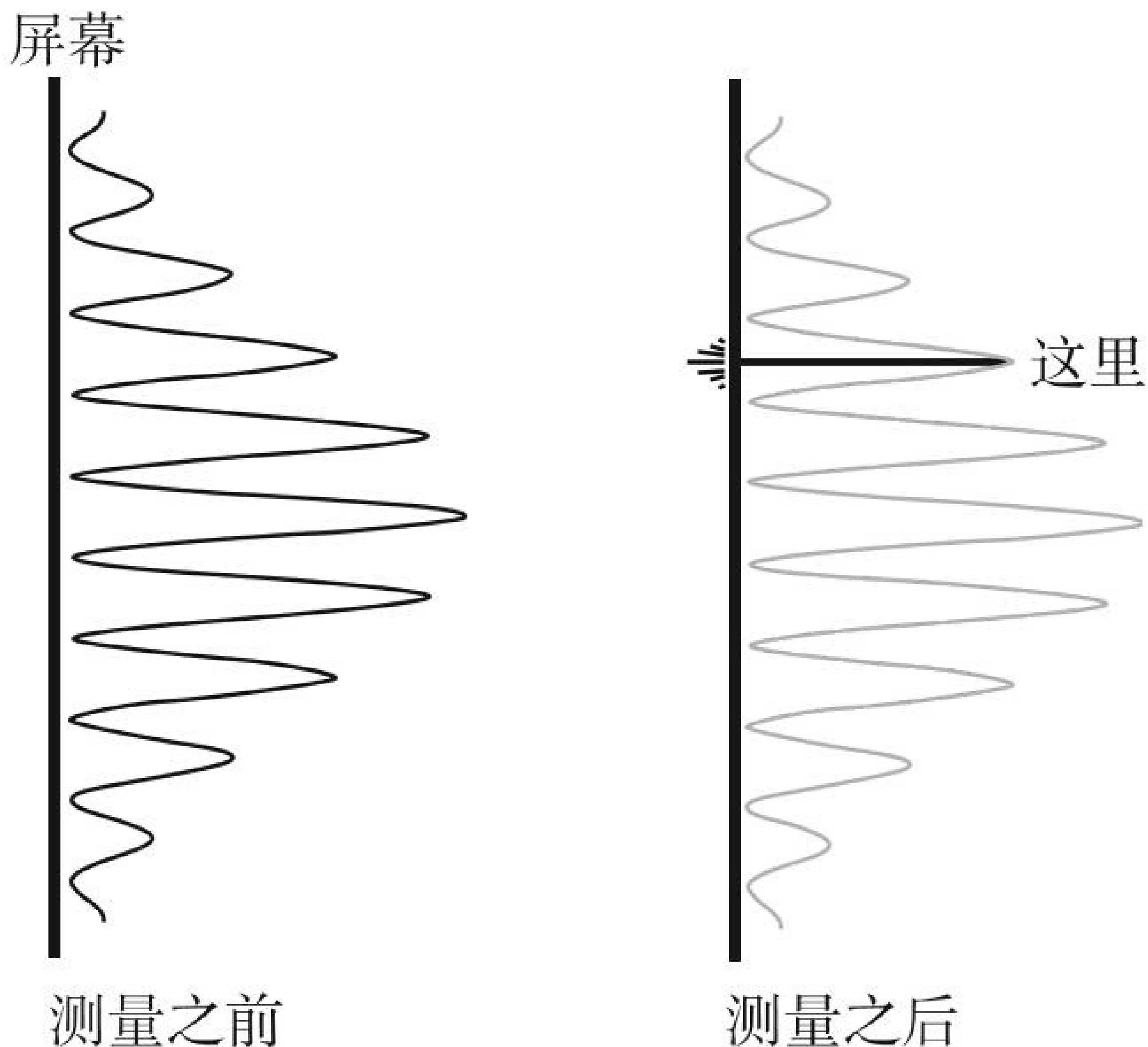


图7 在测量之前，双缝干涉产生的电子波形成了高低起伏的概率幅（左图）。测量之后，记录下来的电子位置就只有一个，即右图中的“这里”处。这就是“波函数的坍缩”

更不妙的是，在量子力学中，波函数的坍缩这一过程完全是假想的。我们假设波函数坍缩了，只为了“解释”为什么一个分布式的、非局域性的量子系统会在一次测量的过程中突然局域化。没有任何数学公式要求坍缩发生，甚至没有任何数学公式可以描述坍缩过程。

爱因斯坦对此很不高兴。量子坍缩必须在瞬间发生，这在表面看来似乎违反了狭义相对论，因为狭义相对论要求任何物理作用或有物理效

应的信息传递速度都不能超过光速。实际上，很容易构想出一种量子系统，其坍缩会导致信息瞬间飞越很远的距离，爱因斯坦称其为“幽灵般的超距作用”。爱因斯坦花了大力气才把超距作用从对引力的描述中赶出去，难怪他会不喜欢量子理论的这一特征。

量子力学的概率诠释也带来了一些问题。对于所有人来说，原因和结果之间存在直接联系是不可否认的事实（也是共识）。在经典物理学的世界中，如果我们做这件事，那件事就会发生。而在量子物理学所描述的世界里，则是如果我们做这件事，那件事可能会发生，发生的量子概率由那个有着波峰和波谷的波函数决定。爱因斯坦不喜欢“上帝与宇宙玩掷骰子”的概念，反对这件事成了他与玻尔争辩的基础。

如果我们没有证据表明波函数坍缩确实发生了，为什么要假设它们只发生在质子、电子和原子所在的微观尺度上呢？如果它只存在于我们对电子去哪儿了的观察动作的那一瞬呢？这就是薛定谔的猫这个悖论的基础。薛定谔的猫实验通过测量行为，将量子概率从原子一直传递到封闭盒子里的猫身上。量子概率的本质从一个粒子既在这里又在那里，变成一只猫既是活的又是死的——至少在我们打开盒子查看之前如此。在我们打开盒子观察的一刹那，波函数坍缩，猫的命运就此被决定。

海森堡的不确定性原理为我们测量电子这类量子粒子性质的精度设置了基本限制。这些性质包括电子在空间中的位置和它的动量，以及它的能量和能量随着时间的变化速度等。

海森堡最初推导出这条原理时，是想表明在量子世界里，你在测量的同时一定会以某种不可预测的方式对测量对象造成干扰。不管我们的实验技术多么精确、多么先进，它们总是会“笨手笨脚”，阻止我们同时精确测量电子通过双缝的路径（粒子性）和记录下干涉条纹（波动性）。不确定性原理对“什么东西是可测量的”设定了限制[注]。

但玻尔从根本上就不认同这个诠释，他与海森堡展开了激烈的争

辩。[注]玻尔认为，我们之所以用经典的波和经典的粒子概念来描绘实验结果，是因为习惯了经典的宏观体系的我们只能使用这样的概念。不管电子的真正本质如何，它的表现取决于我们选择哪种方法来测量它。在这次测量里我们发现它是波，在下一次测量里我们可能就会发现它是粒子。这两种测量是互斥的：我们可以问电子到底是粒子还是波，它是波就不是粒子，是粒子就不是波，但我们不能问电子到底是什么——这不是一个有意义的问题。

玻尔认为，波和粒子这两种非常不同的行为并不是矛盾的，而是互补的。首次从海森堡那里听到不确定性原理时，玻尔就意识到，这种互补性设定并非像海森堡认为的那样限制了什么是可测量的，而是关于什么是可知的限制。这种想法后来被纳入一种关于如何理解量子力学意义的整体认知，称为哥本哈根诠释（Copenhagen interpretation）。[注]

在双缝实验中，如果我们不尝试追踪电子的去向，我们就会发现电子表现出波动性。但如果我们去观察电子为什么会表现出波动性，电子就会转而表现出粒子性。这两种行为是互补的，又是互斥的，我们没有办法让粒子同时表现出波动性和粒子性。

海森堡说仪器的“笨手笨脚”限制了我们同时精确测量到粒子的位置和动量，这好像暗示了电子实际上存在精确的位置和动量，或者可以既沿着确定的轨迹运动，又表现出干涉现象。原则上，只要我们有足够的智慧设计出最精妙、最不“笨手笨脚”的实验，我们就能同时测量出这些精确的量。然而，玻尔却认为不能同时精确地测量电子的这两种物理性质与我们的聪明才智无关，它是量子层面的客观实在的本质。我们不能设计出更精确的实验，因为这类实验从根本上就是不可能被设计出来的。

这是个非常深层的问题。为了消除波函数坍缩的过程以及互补性的说法，或者通过某种方式处理这一问题，科学家提出了一系列量子理论

的其他诠释，已经形成了一个新领域。或许确实存在一些更细微的机制（被统称为“隐变量”）可以解释粒子系统的波动性或波动系统的粒子性，这类隐变量可能是局域性的，意味着它们在单个粒子的层面上运动，也可能是非局域性的，比如有某种“导航波”指引着粒子沿着事先决定的路径运动。这些诠释认为，电子不是互补性原理所认为的非波即粒子，而是既是波又是粒子。

爱因斯坦本人在1927年不太认真地研究过这些想法，但他认为它们都“没有多大价值”(注)。在他与玻尔的争论中，他没有尝试解决这些问题，而是提出了一系列更加具有独创性的思想实验，试图证明量子力学要么是自相矛盾的，要么是不完备的。玻尔的立场很坚定，他一一还击，一次次成功地捍卫了哥本哈根诠释，有次还用爱因斯坦自己提出的广义相对论打败了爱因斯坦本人。

但是玻尔的还击越来越依赖“笨手笨脚”的说法，也就是测量对系统造成的必要且不可避免的干扰。这正是玻尔批评过的海森堡的想法。爱因斯坦意识到，他需要找到一个不直接依赖于测量带来的干扰特性的挑战，这样才能彻底动摇玻尔的还击，赢得这场争论。

1935年，爱因斯坦与两位年轻的理论物理学家鲍里斯·波多尔斯基（Boris Podolsky）和内森·罗森（Nathan Rosen）对哥本哈根诠释提出了最终挑战。我们在这里就不详述细节了，只介绍原理。爱因斯坦–波多尔斯基–罗森（EPR）思想实验（也简称为EPR佯谬）基于两个“纠缠”粒子组成的物理系统，“纠缠”意味着根据量子理论，它们的物理行为由单个波函数决定。这一波函数可以被写成所有随后可能进行的不同测量结果的组合（即叠加）。

结果就是，这两个粒子的性质发生了关联。这些性质到底是何种性质并不重要：如果一个粒子具有其中一种性质（可能是“向上”、“正”或是“垂直”），那么根据简单的守恒定律，另一个粒子就必须具有与之相

关联的性质（相应地为“向下”、“负”或是“水平”）。根据哥本哈根诠释，只有在测量的一瞬间，波函数坍缩，这两个粒子才拥有这些性质。在这一瞬间，粒子的测量结果（“向上”还是“向下”，“正”还是“负”）由概率决定，原始波函数给不同的可能结果的出现概率指定了不同的权重。

EPR三人提出的挑战的巧妙之处来了。因为两个纠缠粒子的性质有关联，不管我们的测量手段多么“笨手笨脚”，我们测量了其中一个粒子的性质后，都能知道另一个粒子的性质。通过纠缠的机制，我们会发现可以在不破坏其中一个粒子的状态的同时，精确无误地测量它的性质。在实际情况下，我们可能受到实验室条件的限制，但在原理上，哪怕另一个纠缠粒子位于宇宙尽头，我们在测量了手头的粒子之后也能知道它的性质。

这是不是意味着波函数的坍缩必须能在瞬间到达宇宙尽头，以便让遥远的粒子拥有这个性质呢？EPR三人写道：“没有哪种合理的现实能够允许这种事情发生。”[注]

我们当然可以假设这些性质在粒子产生时就已经被确定下来了：这个朝上，那个朝下，从粒子诞生时就如此。这样一来，测量只是告诉我们一个粒子具有何种性质，而我们通过推理知道了另一个粒子的性质。但如果我们假设粒子性质从一开始即已确定，我们就需要一个与量子理论不一样的局域隐变量理论。

爱尔兰理论物理学家约翰·贝尔（John Bell）意识到，如果这类隐变量确实存在，那么关于纠缠粒子的实验就会产生不符合量子理论预测的结果。我们可以先不管这些隐变量具体是什么。假设某种形式的隐变量存在，那么两个粒子就是局域性真实的——它们分离时是两个拥有确定性质的独立实体，并且会一直保持互相独立，直到其中的一个被测量或两个都被测量为止。

但量子理论要求这两个粒子是非局域性的，由一个波函数同时描述。这两种理论的矛盾，就是贝尔定理的基础。(注)

贝尔在1966年发表了贝尔定理，不到几年就有人做出了第一批检验它的实验。这些实验中最广为人知的是法国物理学家阿兰·阿斯佩（Alain Aspect）及其同事在20世纪80年代初利用纠缠光子的产生和探测所设计并进行的实验，他们的结果有力地证明，量子理论是对的。(注)

斯莫林幸运地在图书馆找到了一本名叫《阿尔伯特·爱因斯坦：哲学家—科学家》的书，其中有一章是玻尔写的，生动地描绘了玻尔与爱因斯坦那场著名争论的细节。这本书激发了斯莫林对量子理论更为基础，或者说更为哲学的方面的兴趣。在此情况下，如果他的老师对于量子力学只采取工具主义者态度，就很容易让他丧失兴趣，但大一的下半学期，他有幸上了赫伯特·伯恩斯坦（Herbert Bernstein）讲授的量子力学课程，后者在斯莫林眼中是一位极好的物理学老师。在这门课的结尾，他们详细讨论了EPR三人的论证和贝尔定理。“贝尔的论文在当时并不广为人知，被引用的次数也很少，”斯莫林解释道，“我们那门课可能是当时唯一包含EPR论证和贝尔定理的本科生量子力学课。”(注)

斯莫林在阅读并尝试理解了很多原始研究论文以后，回到了自己的房间，躺在床上思考了很久。

EPR思想实验迫使玻尔放弃了是实验手段的限制使我们不能同时测量粒子所有性质的观点，实现了爱因斯坦的目的。但这也让玻尔毫无退路，只能认为我们选择进行哪种测量，以及选择了哪种仪器进行测量，这样的决定会瞬间影响到任意远处的纠缠粒子的性质和行为。这是一个尤其让人不安的想法。英国物理学家安东尼·莱格特（Anthony Leggett）在多年后总结道：“在我们的经验中，没有哪种物理学暗示实验结果会受到实验者口袋中钥匙的位置或者墙上时钟所指的时间的影响。”(注)

贝尔设想的那类局域隐变量理论受到两条关键假设的限制。首先，我们需要假设，由于粒子性质已被隐变量决定，不管我们测量第一个粒子时得到什么样的结果，都不会影响我们同时或之后测量另一个遥远粒子得到的结果。第二条假设是，无论我们如何设定仪器以测量第一个粒子，都不会影响我们测量第二个粒子得到的结果。

如果我们去掉第二个假设，只保留第一个假设，就产生了一种“加密”非局域隐变量理论。正如玻尔所述，测量的结果会受到我们选择测量哪个量（即设定仪器）的影响，但至少测量结果在某种程度上还是事先注定的。在这类理论中，波函数在某种程度上会“感知”到即将发生的事情，并为之做好准备。虽然波函数坍缩的过程不存在了，但这个版本的理论仍然保留了一些“幽灵般的”特征。

莱格特发现，仅仅去掉第二个假设而保留第一个假设不足以产生量子理论预言的所有现象。同贝尔在1966年所做的一样，莱格特也奠定了直接检测量子力学局域性的实验的基础。其实，归根结底就是一个简单的问题：像电子这样的量子粒子，在我们测量它们之前，它们拥有我们指派给它们的性质吗（或者说，它们究竟拥有性质吗）？

2006年[注]和2010年[注]，科学家各做了一次实验来探究这个问题。答案非常明确：我们必须同时抛弃以上两个假设。2015年，有一些检验贝尔不等式的实验的相关文章发表，它们在堵上了多种漏洞的情况下证明了量子力学的正确性。[注]看样子，不管我们多么努力避免波函数的坍缩，不管它会让现实的定义看起来多么令人难以置信，我们还是不得不涉及这个过程。

我并不是想要误导读者。有几种方法可以避免波函数坍缩在概念上带来的混乱，但我一直认为，为了避免波函数坍缩而引入其他诠释，仅仅是一种绝望甚至是疯狂的举动而已。有人认为这种坍缩是一种真实的物理学现象，在有意识的生物想要打开盖子看一眼的时候就会触发。这

种诠释只是把量子力学的深层奥秘与更深层的关于意识的奥秘合并了而已，而我从来都不认为这会是一条有希望的道路。

也有人认为，坍缩实际上根本没有发生，只是整个宇宙分裂成了两个平行的版本而已。在多世界中的一个世界里，电子就在这里，猫活着，格温妮丝·帕特洛（Gwyneth Paltrow）上了地铁，最终死在新爱人的怀里。[注]在其他世界里，电子在那里，猫死了，格温妮丝·帕特洛错过了这班地铁，活到了向大家讲述这个故事的时候。

平行世界会是解决问题的更好方式吗？也许量子引力理论可以给我们一些启发。

---

1. Werner Heisenberg,Physics and Beyond: Memories of a Life in Science,George Allen & Unwin,London,1971,p.73.
2. Einstein wrote: ‘The theory produces a good deal but hardly brings us closer to the secret of the Old One.I am at all events convinced that He does not play dice’.Albert Einstein,letter to Max Born,4 December 1926.Quoted in Abraham Pais,Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein,Oxford University Press,Oxford 1982,p.443.
3. P.A.M.Dirac,The Principles of Quantum Mechanics,4th edition,Oxford University Press,Oxford,1958,pp.viii–ix.
4. Paul Dirac,interview 6 May 1963,Archives for the History of Quantum Physics,p.6,quoted by Graham Farmelo,The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac,Quantum Genius,Faber & Faber,London,2009,p.44.
5. Paul Dirac,in G.Holton and Y.Elkana (eds),Albert Einstein: Historical and Cultural Perspectives,Princeton University Press,Princeton,NJ,1982,p.84.Quoted by Farmelo,The Strangest Man,p.137.
6. Carlo Rovelli,personal communication,29 January 2017.
7. Richard Feynman,The Character of Physical Law,MIT Press,Cambridge,MA,1967,p.129.The italics are mine.
8. Richard P.Feynman,Robert B.Leighton,and Matthew Sands,The Feynman Lectures on Physics,volume III,Addison-Wesley,Reading,MA,1965,p.1.
9. 如今，有很多教师讲解不确定性原理时，使用的仍旧是这一版本的解读。他们真的应该更新一下认知了。

10. Heisenberg wrote: ‘I remember discussions with Bohr which went through many hours till very late at night and ended almost in despair; and when at the end of the discussion I went alone for a walk in the neighbouring park I repeated to myself again and again the question: Can nature possibly be as absurd as it seemed ...?’Werner Heisenberg,Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science,Penguin,London,1989 (first published 1958),p.30.

11. 这时，玻尔已经在嘉士伯基金会的支持下，在哥本哈根建立了核物理研究所。哥本哈根诠释的主要建立者是玻尔、海森堡和泡利，不过他们三人的观点也各有不同。

12. Albert Einstein,letter to Max Born,1952.Quoted in John S.Bell,Proceedings of the Symposium on Frontier Problems in High Energy Physics,Pisa,June 1976,pp.33–45.This paper is reproduced in J.S.Bell,Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics,Cambridge University Press,Cambridge,1987,pp.81–92.The quote appears on p.91.

13. Albert Einstein,Boris Podolsky,and Nathan Rosen,‘Can QuantumMechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?’,Physical Review,47,1935,777–80.This paper is reproduced in John Archibald Wheeler and Wojciech Hubert Zurek(eds),Quantum Theory and Measurement,Princeton University Press,Princeton,1983,p.141.

14. Bell wrote: ‘If the ［hidden variable］ extension is local it will not agree with quantum mechanics,and if it agrees with quantum mechanics it will not be local.This is what the theorem says.’ John Bell,‘Locality in Quantum Mechanics: Reply to Critics’,Epistemological Letters,November 1975,2–6.This paper is reproduced in Bell,Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics,pp.63–6.This quote appears on p.65.

15. Bell’s theorem can be expressed in the form of an inequality between sets of experimental results.For example,for one specific experimental arrangement,the generalized form of Bell’s inequality demands a value that cannot be greater than 2.Quantum theory predicts a value of $2\sqrt{2}$,or 2.828.Aspect and his colleagues obtained the result 2.697 ± 0.015.In other words,the experimental result exceeded the maximum limit predicted by Bell’s inequality by almost fifty times the experimental error,a powerful,statistically significant violation.

16. Lee Smolin,personal communication,7 September 2017.

17. A.J.Leggett,‘Non-local Hidden Variable Theories and Quantum Mechanics: An Incompatibility Theorem’,Foundations of Physics,33(2003),1474–5.

18. Like Bell’s theorem,Leggett’s crypto non-local hidden variables theory can also be tested through an inequality between experimental results.For a specific experimental arrangement,the whole class of crypto non-local hidden variable theories predicts a maximum value for the Leggett inequality of 3.779.Quantum theory violates this inequality,predicting a value of 3.879,a difference of less than 3 per cent.The experimental result was 3.852 ± 0.023,a violation of the Leggett inequality by more than three times the experimental error.See Simon Gröblacher,Tomasz Paterek,Rainer Kaltenbaek,Caslav Brukner,Marek Zukowski,Markus

Aspelmeyer,and Anton Zeilinger,'An Experimental Test of Non-local Realism',Nature,446 (2007),875; arXiv:quant-ph/0704.2529v2,6 August 2007.

19. In these experiments for a specific arrangement the maximum value allowed by the Leggett inequality is 1.78868,compared with the quantum theory prediction of 1.93185.The experimental result was 1.9323±0.0239,a violation of the inequality by more than six times the experimental error.See J.Romero,J.Leach,B.Jack,S.M.Barnett,M.J.Padgett,and S.Franke-Arnold,'Violation of Leggett Inequalities in Orbital Angular Momentum Subspaces',New Journal of Physics,12 (2010),123007.

20. For a summary,see Alain Aspect,'Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate',Physics,8,123,16 December 2015,available at http://physics.aps.org/articles/v8/123.

21. 这是1998年的爱情片《双面情人》（Sliding Doors）中的情节。影片由彼得·豪伊特（Peter Howitt）执导，格温妮丝·帕特洛主演。

第4章 重新定义质量

当我第一次看到越来越多的电子穿过双缝，依次打在屏上，从而从模糊到清晰地慢慢呈现出干涉条纹的景象时，我感到很不舒服。我学过量子力学，也深谙其原理，但我还是无法完全驱除自己根深蒂固的经典直觉。如果一个电子同时穿过了两道狭缝，与自身干涉，最终又在遥远的屏或照相底片上打出一个单个的点，那电子的质量在中间又是如何分布的呢？

要想回答这个问题，我们就要走上一段真正神奇的量子理论之旅，这一理论被称为粒子物理的标准模型。

20世纪20年代到30年代初的理论先驱们发展出来的量子力学是革命性的，而且对我们认识物质与辐射产生了非凡的影响。这一理论至今仍然完美地保持着准确有效（大学理科课程几乎以原封不动的方式把它教授给学生），但它的适用范围相当有限。它可以用来描述在物理过程中保持完整的粒子所在的量子系统，例如在原子各个轨道之间移动的电子，或是穿过双缝的电子；但它不能描述粒子被产生或被消灭的情况，因此不能描述很多有趣的物理学现象。

海森堡、泡利、狄拉克等物理学家意识到，他们需要一种描述量子场的理论。这类量子场在空间的每一个点处都有一个强度，因此就像是一道弥漫的、三维的波，是非局域性的。在关于波的经典理论中，场的能量可以连续地增加或减少，但在量子场中，能量只能以离散的量子的形式增加或减少。

狄拉克在根据他于1964年在美国纽约的叶史瓦大学所做的一系列讲座整理出版而成的《量子力学讲义》（*Lectures on Quantum Mechanics*）中总结道：“根据德布罗意和薛定谔的总体思想，每个粒子

都与波有关，这些波都可以被看作场。”[注]

量子本身也可以被解释为标志性的涨落、扰动，或者说是量子场的激发。在量子场论中，波粒二象性体现在空间延展的非局域场（波）的局域涨落（粒子）上。这样，我们就能完全自由地讨论场本身的性质与行为，或是它产生的量子的性质与行为了。这两种表示方法是同等有效的（玻尔会称它们是互补的），但一旦涉及测量，它们就变成互斥的了。

很明显，光子一定是电磁场的量子，在带电粒子相互作用时被产生和消灭。一个严格意义上的量子场论必须能描述电子场（其量子是电子）和电磁场（其量子是光子）之间的相互作用。

要构建量子场论，第一步显然应该是将量子力学的性质与行为引入麦克斯韦的经典电磁场理论。物理学家意识到，如果将量子力学与麦克斯韦电磁理论结合起来并满足狭义相对论的要求，得到的将是量子版的电动力学，他们称之为量子电动力学（quantum electrodynamics，简称QED）。

海森堡与泡利在1929年得出了一个QED的早期版本，但遇到了一些巨大的问题。这些问题直到1947年才被解决，而解决这些问题的关键是一种数学上的特殊技巧，需要我们以前所未有的新角度思考质量这一概念。

公平来讲，哪怕是在经典物理学中，质量这一概念的含义也比我们平常以为的更为神秘难懂。牛顿在《原理》中对质量的定义完全是循环的，因此他根本就没有定义质量。而渊博的头号经验主义者马赫则试图把对质量的定义变成操作性的来加以澄清，本质上是想把质量（不管其本质是什么）与某种标准联系起来。

当然，以上种种并没有动摇我们的信心，我们在这个物理世界生活

了一辈子，对质量是什么大体上还是知道的。

为了理解解决QED难题究竟需要什么，我们需要从两个方面透视量子世界的本质。其一，在量子场论中，力是在场或粒子之间传递的。主宰着物质的性质与行为的基本粒子（比如电子），与传递物质粒子之间相互作用的基本粒子（比如光子）是两类不同的粒子，这一区别是德国物理学家汉斯·贝特（Hans Bethe）与意大利物理学家恩里科·费米（Enrico Fermi）在1932年提出的。

不同的基本粒子不仅有不同的电荷与质量，在另外一种性质上也不相同，那就是自旋（spin）。之所以给这个性质起名为“自旋”，是因为20世纪20年代一些物理学家认为电子就像一个带电的小球，绕着一根轴自转，就像地球在围绕太阳公转的同时绕着地轴自转一样。电子其实并不是这样运动的，但“自旋”这个名字沿用了下来。

自旋其实表示了一个粒子的内禀角动量（角动量可以理解为物体旋转的动量），但不只是一个粒子绕着一根轴自转那么简单。这么说吧，如果真要采用绕轴自转的比方，我们就需要设定电子绕着轴转两周才能回到原来的位置。[注]电子的自旋量子数为1/2，因此只能取两个自旋取向中的一个：在磁场中，它只能“指向”两个方向，要么向上（+1/2），要么向下（–1/2）。

根据电子自旋的这一特性，可以把它归为基本粒子中的费米子（fermion）一类，“费米子”的名字取自恩里科·费米。物理学家发现，所有的物质粒子都是费米子。传递力的粒子则是另一类粒子，被称为玻色子（boson），以印度物理学家萨蒂延德拉·纳特·玻色（Satyendra Nath Bose）的名字命名，其自旋量子数为整数。光子的自旋量子数为1。

了解了这一知识以后，我们就可以绘制出两个电子相遇时的图景了。我们知道同性电荷相斥，因此可以想象两个电子在互相靠近的时

候“感受”到了某种静电排斥力，把它们彼此推开。电子在移动的过程中会产生电磁场（这是无线电通信的基础），而在量子场论中，电子之间的相互作用是通过电磁场来传导的，而且表现为光子的交换。交换光子改变了电子之间的相对运动速度和方向，让它们互相远离。我们看不见在它们之间交换的光子，因此这种光子被称为“虚光子”，但“虚”并不代表它们不真实存在。

理查德·费曼发明了一种简单的视觉方法来分析这种相互作用，只需要画几条简单的线即可，这种图被称为费曼图。在费曼图中，我们会绘制粒子在广义“空间”（表示三维空间）和“时间”中的移动。粒子的运动用直线表示，它们受到的力用在它们之间传递的虚粒子表示，通常画成波浪线（见图8，图8表示两个物质粒子之间的斥力）。

透视量子世界本质的另一方面与海森堡不确定性原理有关。我们很容易以为不确定性原理是一个限制性的原理，它限制了我们同时测量某些物理性质的精确性，比如位置和动量，以及能量和时间，但这其实是一种误解。不确定性原理是把双刃剑。

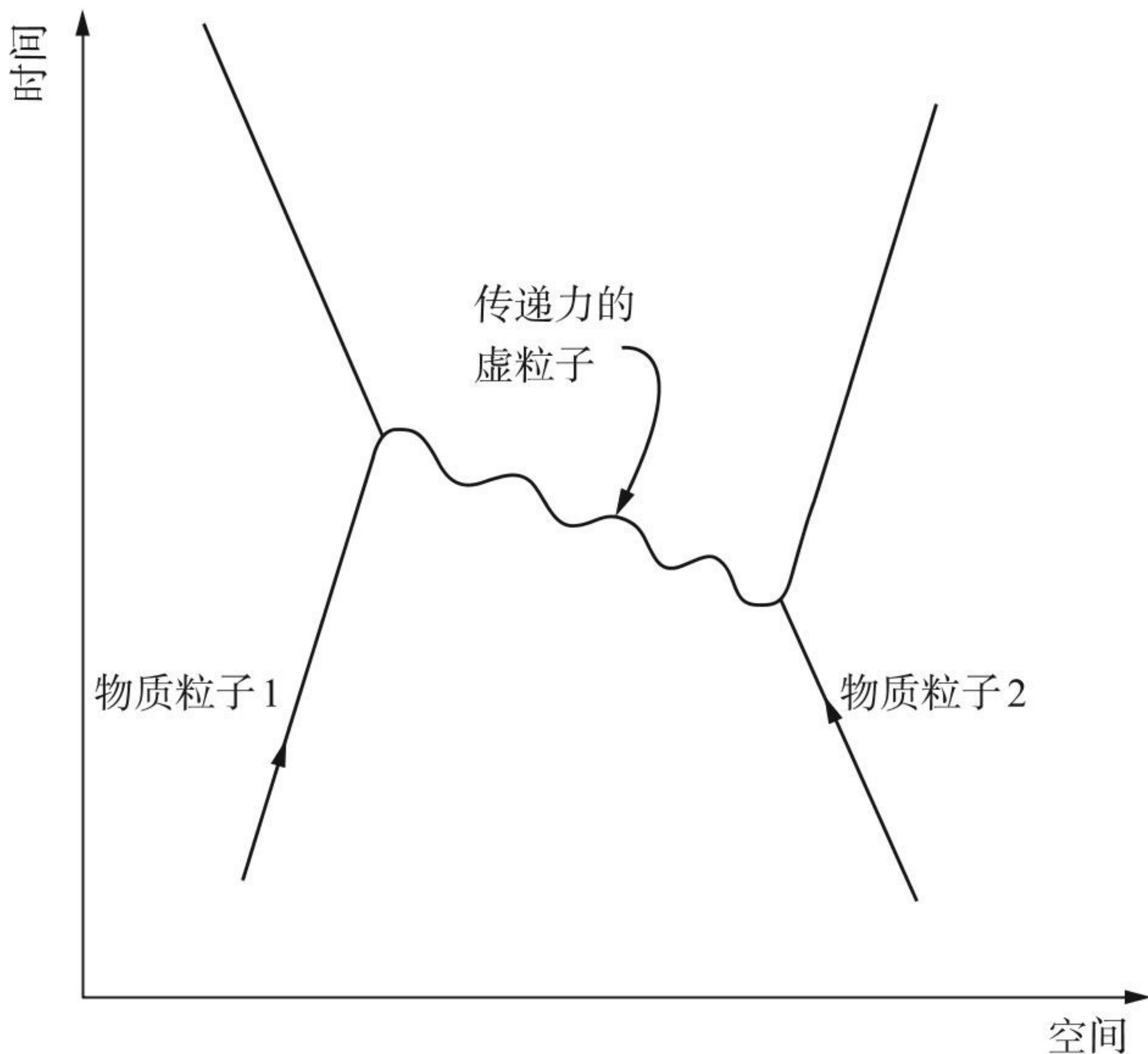


图8 在费曼图中，物质粒子的运动用“时间”和“空间”中的直线表示，它们之间因虚粒子传递而产生的力用波浪线表示

假设我们能创造出完全的真空，在这样的真空中，量子场（比如量子电磁场）的能量为零。在这样的真空中，没有任何东西可以施加任何物理作用，我们可以迅速得出结论，判断这个场的能量随时间的变化率也为零。但是这就违反不确定性原理了：零是一个确定的测量结果，因此在真空中，量子场的能量和它随时间的变化率不能同时为零。

不确定性原理并不禁止一无所有的真空凭空“借”一点儿能量来创造虚光子，甚至创造虚物质粒子，只要这些能量能在符合不确定性原理要

求的时间以内“还回去”。借来的能量越大，就得还得越快。

因此，可以说真空中充满了随机的量子涨落，就像波涛翻滚的海洋表面的湍流一样。不过，我们知道，真空场中的涨落等价于粒子，它们是虚粒子，就像某种背景噪声。不管是能量还是能量的变化率，平均值都为零，但它们在时空中的每一点都不为零。“空”的空间其实并不空，而是一系列疯狂涨落的量子场与虚粒子组成的混沌景象。注有时，这些随机涨落会碰巧形成一对粒子与反粒子，然后迅速湮灭。

现在，我们将费曼图与不确定性原理结合在一起。一个与电磁力相关的作用过程并不仅仅包含一个虚光子的交换，它可能还会包含两个虚光子，或者一个虚光子瞬间产生一对电子与正电子，然后湮灭成一个光子的过程。这些可能性是无穷无尽的，只要符合不确定性原理的要求即可。但越复杂的过程，其发生概率就越低，它对整个作用的贡献也就越小。这些小的贡献被称为辐射修正（radiative correction），物理学家通过画费曼图来计算他们产生的影响。

理论物理学家意识到，早期QED的问题在于：如果考虑一个电子与它自己产生的电磁场发生的相互作用，就会让方程中的有些项增加到无穷大，这意味着电子被一群虚粒子包围，这些虚粒子各自都有能量，根据$m=E/c^2$，电子加上这群虚粒子以后的总质量就要大于不考虑它自身的电磁场情况下的“裸”质量。

我们永远都不可能知道电子的裸质量是多少：但是如今我们可以通过巧妙地处理QED方程组来解决这个问题。理论物理学家发现，将描述电子一种物理状态的方程减去描述电子另一种状态的方程，就能消掉无穷大的项。从表面上看，用一个无穷大减去另一个无穷大好像不是很有意义，但物理学家发现，这么做得出的结果不仅是有限的，而且是正确的。这种数学上的小花招被称为质量重正化（mass renormalization）。狄拉克作为一名数学上的纯粹主义者，认为这种小花招非常“丑陋”。

但没有人能反驳一个完全相对论版本的QED，即满足爱因斯坦狭义相对论需求的QED的威力。以电子的g因子为例，这是决定了电子与磁体之间相互作用的常数。QED预言的g因子的值为2.00231930476，而实验测得的值为2.00231930482。

费曼写道："为了让你感受一下这些数字是何等精确，可以举这么一个例子：如果你测量的是从纽约到洛杉矶的距离，要达到这个精度，你测量的误差不能超过一根头发的直径。"[注]

QED的成功，驱使着20世纪50年代的物理学家致力于寻找能描述大自然的其他基本作用力的量子场论。此前人们已经知道，是电磁力将原子中带正电的原子核与带负电的电子束缚在一起，但观测和实验都表明，在原子核之内还存在另外两种作用力。

当时人们认为原子核中只存在两种物质粒子：带正电的质子和电中性的中子，它们的质量差不多大（但并不完全相同），大约是电子的2000倍。将原子核中的质子和中子束缚在一起的力被称为强核力。

我们可能会认为仅凭强核力和电磁力足以解释原子及原子核的行为，但物理学家发现，中子非常不稳定，它很容易发生放射性衰变，变成一个质子，并发射出一个高速运动的电子和一个被称为"中微子"（neutrino，在意大利语中意为"中性的小东西"）的奇特粒子。[注]这一过程只能通过引入第三种作用力来解释，我们称这种作用力为弱核力或弱相互作用力（简称弱力）。

很快，理论物理学家遇到了越来越多的问题。尽管电磁力的强度随着带电物体之间距离的增大而减小，但它仍然属于长程力，哪怕距离拉到无穷大都仍然存在。这种长程力通过无质量、速度达到光速的光子来传递是没有问题的，但弱核力与强核力的作用范围非常小——它们只在原子核内才有效，在原子核之外就不起作用了。

1935年，日本物理学家汤川秀树提出，与无质量的光子传递电磁力相对，传递短程作用力的粒子必须是有质量的“重”粒子。根据他的估计，将质子与中子束缚在一起的强核力的传递粒子的质量应该是电子质量的200倍左右。这类力的传递者在物质粒子之间的移动会相对迟缓，速度比光速小得多。㊟

不过，尽管20世纪50年代早期的物理学家拼尽全力，他们还是没能构建出一个包含较重的力的载体的量子场论。理论中一定缺失了什么东西。

从美国物理学家朱利安·施温格（Julian Schwinger）在1941年发表的一篇相当离奇的推测性论文中，我们或许能够找到线索。这篇论文到了20世纪50年代几乎被人遗忘，但施温格此时已经成为QED的主要建构者之一。施温格注意到，如果我们假设弱力由一种类似光子的无质量粒子所传递，那它的强度和作用范围就和电磁力完全相同。不管在哪方面，弱力和电磁力都可以被认为是同一种力，一种统一的“电弱”（electro-weak）力。

施温格把这个难题交给了他在哈佛大学的研究生谢尔登·格拉肖（Sheldon Glashow）。格拉肖在经过了几次错误的尝试之后，构造出一种包含弱力的量子场论，其中弱力由三种粒子传递。这三种粒子中，有两种粒子是带电的，如今分别被称为W^+和W^-粒子；另外一种粒子是不带电的，如今被称为Z^0粒子。格拉肖的理论认为，这三种粒子都应该像光子一样没有质量，这样一来，弱力就和电磁力一样是长程力而非短程力了。在这种情况下，如果格拉肖试图人为地给粒子加入质量以对方程进行模糊处理，理论就无法重正化了。

在传递弱力的粒子身上一定发生了某种不同寻常的事情——它们通过某种方式“获得了质量”，从而让电弱力分裂成了我们今天所见到的电磁力和弱力。对于这种分裂现象，物理学家有一种独特的描述方式，叫

作“对称性破缺”，它在数学和物理学两个方面都有很深刻的含义。某种方式让电弱力的对称性发生了破缺，产生了两种新的力。

在1964年发表的一系列研究论文中，物理学家渐渐计算出了该理论的细节。[注]从某种意义上讲，整个20世纪50年代的量子场论相关工作都不能解释电弱力对称性的破缺。当时的物理学家不能解释传递弱力的粒子到底“握住”了什么东西，才发生了被我们解释为获得质量并减慢速度的过程。我们需要另一种完全不同的量子场来解释粒子的作用。

物理学家采用了多种类比来尝试形象地解释这部分的物理过程，最受欢迎的一个比喻是这么说的：这种神秘的新量子场就像黏稠的糖浆，裹住了粒子，拖慢了它们的运动速度，这种阻碍加速的趋势与质量产生的效应类似。这种类比当然并不完全恰当，但至少它帮助我们想象了物理过程的大概图景。

自1972年开始，这种神秘的新量子场被称为希格斯场，得名于英国理论物理学家彼得·希格斯（Peter Higgs），他是1964年发表的几篇论文之一的作者。希格斯场的特征性量子涨落被称为希格斯玻色子。

根据这一机制，美国物理学家史蒂文·温伯格（Steven Weinberg）和生于巴基斯坦的物理学家阿卜杜勒·萨拉姆（Abdus Salam）分别在1967年和1968年发表论文，[注]提出了完善的关于弱力的量子场论。随着1971年荷兰物理学家马蒂纳斯·费尔特曼（Martinus Veltman）和赫拉德·特霍夫特（Gerard’t Hooft）证明这一理论是可重正化的，横在电弱理论面前的最后一道障碍也被消除了。

1967年，温伯格用电弱理论预测了W粒子与Z粒子这三种“重”光子的质量。1982年和1983年，欧洲核子研究中心在粒子对撞机实验中分别发现了它们，其质量与温伯格的预测结果非常接近。

在理论中加入了一个背景性的希格斯场，意味着它就像当代的以太

一样充满整个宇宙空间，不管它实际上是什么。尽管希格斯机制一开始被提出是为了解释W粒子和Z粒子获得质量的过程，但事实证明一切粒子获得质量的过程都可以用它来解释，包括像电子这样的物质粒子。

在没有希格斯场的情况下，所有粒子都没有质量，且都以光速运动。质量将不存在，也谈不上有什么物质实体了，因此也不会有恒星和星系构成的宇宙，没有行星，没有生命，没有人类。因此，美国粒子物理学家利昂·莱德曼（Leon Lederman）把希格斯场的特征粒子称为“上帝粒子”。[注]大多数物理学家都很讨厌这个名字（卡洛·罗韦利后来称这个名字“实在太愚蠢，不值得评论”）。[注]但毫无疑问，这个称呼引起了大众对希格斯粒子的关注。

直到又过了近30年，希格斯的理论才被证实是正确的：2012年7月，CERN首次发现了希格斯粒子。

希格斯理论统一了弱力和电磁力，但强核力呢？这就说到粒子物理理论最不同寻常的一部分了。为了理解20世纪60年代早期发现的一系列新粒子的奇奇怪怪的行为，美国物理学家默里·盖尔曼（Murray Gell-Mann）和乔治·茨威格（George Zweig）分别独立提出，质子和中子或许并不是大自然最基本的粒子，而是各由3个更加基本的粒子组成，盖尔曼把它们称为夸克[注]。

这一想法听起来可能很自然，但考虑到质子只带一个正电荷，而中子不带电，我们只能假设夸克携带着分数单位的电荷。要形成一个质子，我们需要两个带+2/3电荷的夸克和一个带–1/3电荷的夸克，这样才能使总电荷为+1；而要形成一个总电荷为零的中子，我们则需要一个带+2/3电荷的夸克和两个带–1/3电荷的夸克。

这种带+2/3电荷的夸克后来被称为“上夸克”（μ夸克），带–1/3电荷的夸克被称为“下夸克”（d夸克）。为了解释当时已知的其他粒子的行为，物理学家提出了第三种夸克：与下夸克本质上相似，但质量更大

的“奇异夸克”（s夸克，也称“奇夸克”）。

夸克名字里的“上”“下”“奇”被称为夸克的“味”（flavour）。如今人们知道，弱相互作用力改变了中子内部一个夸克的味，把下夸克变成了上夸克，并放出一个电子和一个反中微子，这就使中子变成了质子。

没有人知道到底该怎么理解这件事，大多数物理学家也对此表示怀疑。当温伯格在1967年认真着手用希格斯机制来发展量子场论的时候，他完全没有引入夸克的概念，因为他“根本不相信夸克存在”。[注]

到了1968年，情况发生了变化。那一年，位于美国加州的斯坦福直线加速器中心找到了质子和中子是复合粒子的间接证据，但随之而来的是更多的未解之谜。这些实验结果表明，夸克并非如我们所设想的那样被紧紧地束缚在质子中，相反，它们看起来像是在完全自由地游荡。可是，时至今日，没有人在粒子对撞实验中看到过自由的夸克。如果夸克真的是组成物质的最基本的粒子，又在质子和中子之中闲散地游荡，它们为什么不跑出来呢？

对牛顿引力和电磁力熟悉的我们总倾向于把自然界的力想象成从一个点产生的，通常都是粒子或物体中心的那个点。这个点“产生”了力，力的强度随着与这个点的距离越来越远而逐渐减弱。把一个条形磁铁的北极和另一个条形磁铁的南极相对，它们会互相吸引，而它们之间的距离越远，吸引力就越小。

然而，把质子和中子里的夸克束缚在一起的作用力，与我们平常想象的这种作用力图景相去甚远。1973年，普林斯顿大学的理论物理学家戴维·格罗斯（David Gross）和弗兰克·维尔切克（Frank Wilczek），以及哈佛大学理论物理学家戴维·波利策（David Politzer）证明，夸克之间的作用力使得邻近的夸克之间产生了一种很强的像弹簧一样的弹力，把它们紧紧地捆绑在一起。[注]夸克间的距离越来越近时，弹簧就松了，夸克之间的力也减小了（见图9）。在质子和中子内部，夸克们被拴在一

起，但它们的距离又近到可以让它们“自由地游荡”，而一旦我们尝试把夸克分开，它们之间的作用力会立即表现出来，就像弹簧被拉紧的时候一样。

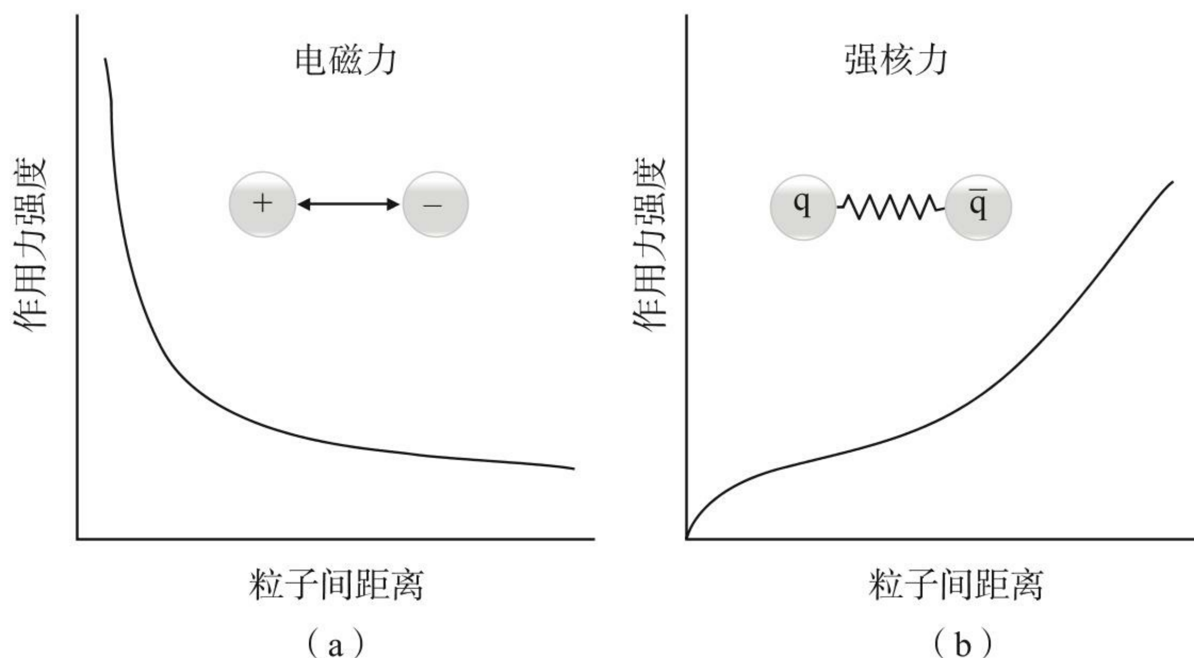


图9 （a）两个带电粒子之间的电磁力的强度会随着粒子间距离减小而增加。（b）夸克之间的作用力不同，在一个夸克与一个反夸克间的距离趋近于零的时候，它们之间的作用力也趋近于零，而距离增大的时候作用力也增大

事实证明，要破坏连接两个夸克的弹簧，所需要的能量得足以在真空中产生新的夸克，以填补把旧夸克拉走后形成的空隙。夸克天生不喜欢被分开，这（可能）就解释了为什么我们从来没见过单个的夸克。

夸克之间的作用力与电磁力和弱力截然不同，因此我们不能通过夸克的电荷或味来研究它们。理论物理学家盖尔曼和哈拉尔德·弗里奇（Harald Fritzsch）别无选择，只能假设夸克拥有第三种性质，他们称之为色（colour）。

每味夸克都有三种不同的色——红、绿、蓝，每个质子或中子包含红色夸克、绿色夸克和蓝色夸克各一个。比方说，一个质子可能由一个红色上夸克、一个绿色上夸克和一个蓝色下夸克组成。这样的设定要求

有8种不同的有色、无质量粒子来传递夸克间的相互作用，它们被称为胶子（gluon），充当了夸克之间的弹簧。该理论把夸克之间的强相互作用力称为色力。

引入这些概念后，1973年盖尔曼、弗里奇和瑞士理论物理学家海因里希·洛伊特维勒（Heinrich Leutwyler）建立了色力的量子场论，即量子色动力学。

进一步的粒子物理实验研究发现了与上夸克本质相似但更重的粲夸克（c夸克）和顶夸克（t夸克），以及与下夸克和奇夸克本质相似但更重的底夸克（b夸克）。我们熟悉的电子的更重的版本则早在1936年就被发现了，它被称为μ子，比μ子更重的τ子则在20世纪70年代中后期被发现。与它们一同被发现的还有一系列中微子——电子中微子、μ子中微子和τ子中微子。电子、μ子、τ子和它们的中微子被统称为轻子。

在这一整套粒子物理的标准模型中，物质粒子被分成三“代”夸克和轻子，其中第一代包括上夸克、下夸克、电子和电子中微子，它们组成了构成我们日常生活中普通物质的原子，以及原子间的相互作用。原则上，谁也不能说不可能存在第四代基本粒子，但已经有一些实验证据和强有力的理论计算表明，这三代粒子就是所有可能存在的粒子了。

除了物质粒子之外，我们还必须加上负责在它们之间传递相互作用的粒子，它们包括无质量的光子（传递电磁力），W粒子与Z粒子（传递弱力）和8种无质量、有色的胶子（传递色力）。希格斯玻色子是标准模型中的最后一种粒子，所有粒子都列在图10中。

我并没有忘记前文提到的汤川秀树的预言，即质子与中子之间的强核力是由一种质量约为电子质量200倍的重粒子传递的。没错，这一预言岂不是与量子色动力学中色力由无质量的胶子传递的观点相矛盾了吗？不过，汤川是把强核力当成像电磁力那样作用在一个中心点的力来考虑从而得出这一预言的，而实际上色力的作用机制与此截然不同。

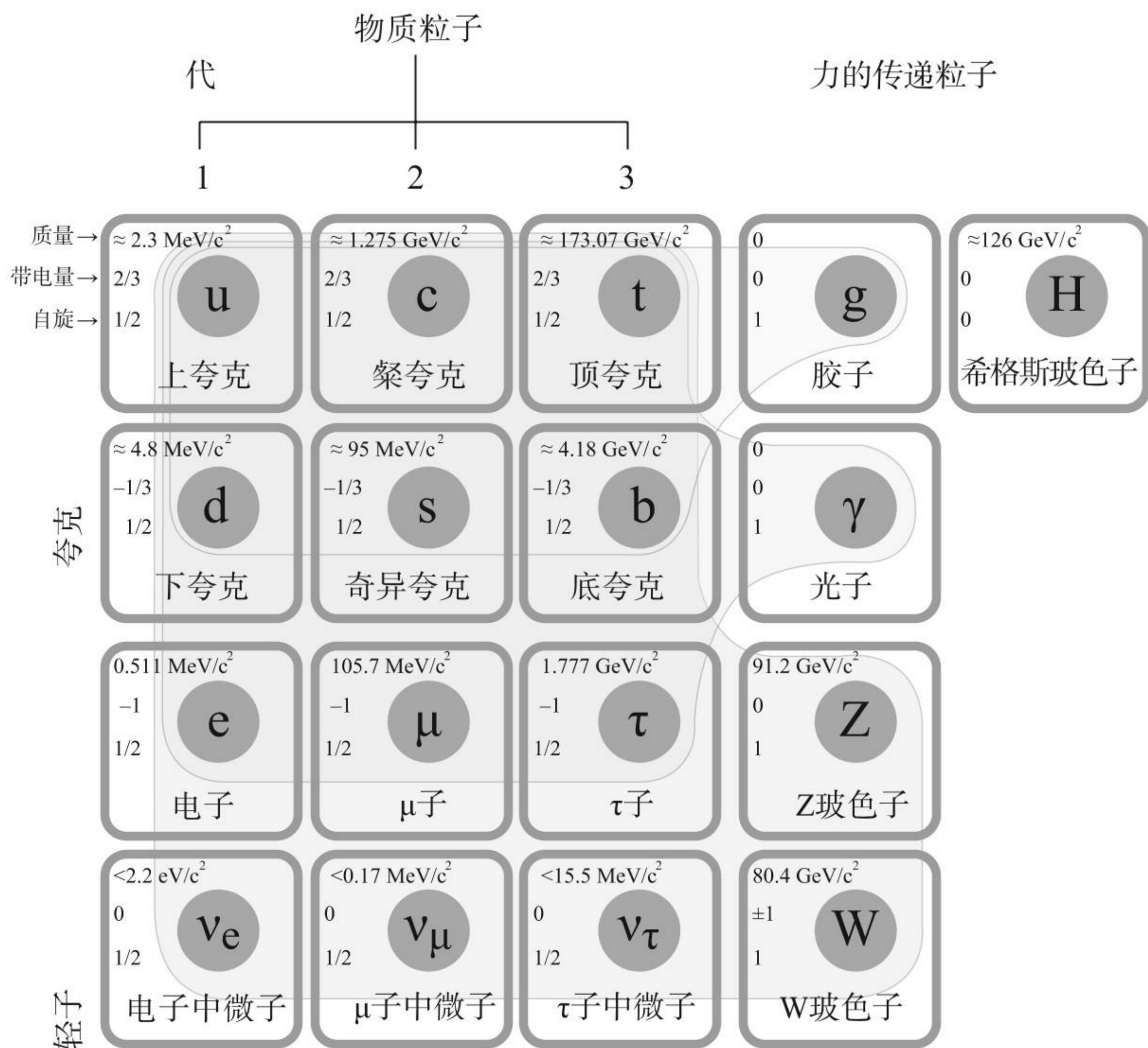


图10 粒子物理学的标准模型描述了三代物质粒子，以及它们之间通过一系列“力的传递粒子”来传递的三种相互作用。物质的质量和力的传递粒子由它们与希格斯场的相互作用所决定

根据QCD的计算，质子和中子内部的能量极高，以至于每个夸克都能产生一团虚胶子，在彼此间传来传去，与它们一道的还有夸克–反夸克对。物理学家有时候管组成质子或中子的3个夸克叫“价夸克”，因为这些粒子拥有足够的能量形成夸克–反夸克对组成的“海洋”。这几个价夸克并不是质子和中子中仅有的夸克。

答案就在这里。尽管色力作用于质子和中子内部的夸克与胶子，但

它会从质子和中子的边界处“漏”出来，让粒子变得“黏糊糊”的。“漏出来”的色力呈现出夸克–反夸克对的形式，被称为π介子，可能带正电、带负电或者不带电。这样一来，我们可以认为π介子传递了质子和中子间的剩余作用力，或称二次作用力。而π介子的质量约为电子质量的265~274倍，这刚好与汤川秀树的预测基本相符。

有了希格斯理论和QCD，我们终于能够简洁而优雅地解释质量的本质了。正如之前所说，所有的物质粒子和力的传递粒子都是通过与希格斯场的相互作用来获得质量的，而像电子这样的物质粒子，其质量取决于包围着它们的虚粒子的能量。

既然单个原子的质量有99%集中在原子核的质子和中子上，我们可能会认为原子质量最终可以追溯到组成质子和中子的上夸克和下夸克的质量。然而，哪怕很难准确估计上夸克和下夸克的质量，科学家也相当确定，组成所有质子和中子的夸克质量总和远小于质子和中子的质量。

实际上，精密的QCD计算表明，一个质子或者中子质量的约95%来自在夸克之间传递色力的无质量胶子的能量。

爱因斯坦的质能方程$m=E/c^2$表明，一个物体的质量可以衡量它所含的能量。从质能方程我们可以推出，质量并不是一个物体所拥有的东西（即它的性质），而是它在做的事情（即它的行为）。

电子场同时穿过了两道狭缝，它的量子概率图案受到了场干涉的影响。电子可以被诠释为场的特征涨落，只有在场与屏或照相底片作用的时候才会产生。就在作用的一瞬间，波函数坍缩，我们所看到的电子（以及它的自旋、电荷与质量）就从空气中浮现出来了。

---

1. Paul A.M.Dirac,Lectures on Quantum Mechanics,Dover,New York,2001 (first published 1964),p.1.

2. It might help to think about electron spin like this.Make a Möbius band by taking a length

of tape,twisting it once and joining the ends together so the band is continuous and seamless.What you have is a ring of tape with only one ‘side’ (it doesn’t have distinct outside and inside surfaces).Now picture yourself walking along this band.You’ll find that,to get back to where you start,you need to walk twice around the ring.

3. 这种过程会产生一种叫作卡西米尔效应（Casimir effect）的现象，以荷兰理论物理学家亨德里克·卡西米尔（Hendrik Casimir ）的名字命名。科学家已经找到了这种效应的实验证据。

4. Richard P.Feynman,QED: The Strange Story of Light and Matter,Penguin Books,New York,1990 (first published 1985),p.7.

5. 实际上，在中子衰变成质子的过程中，释放出来的是反中微子，不是中微子。

6. We can get a rough handle on the relationship between the range of a force and the mass of force-carrying particles by combining Heisenberg’s uncertainty principle and Einstein’s equation $E=mc^2$.A bit of algebraic manipulation then tells us that the range of the force is inversely proportional to the mass of the force-carrier (so the range of a force carried by massless particles like photons is essentially infinite).Yukawa assumed that the range of the strong nuclear force must be on the order of the radius of a proton,from which he deduced the mass of the force carrier to be about 200 times the mass of the electron.

7. 1964年的这一系列文章其实是关于强核力的量子场论。这可能会让你大惑不解，但关于各种相互作用力的原理其实是类似的，而我们很快就可以看到，仅仅3年之后，物理学家把1964 年这几篇文章的结果用在了电弱力上，很快就解决了电弱力对称性破缺的问题。

8. 萨拉姆没有在第一时间发表他得到的结果，因为他想拓展自己的理论，使之也能够解释重子和介子的行为（温伯格只考虑了轻子）。但事实证明这是不可能的，而唯一能证明萨拉姆这一时期的工作的记录就只有1968年5月19—25日在瑞典哥德堡举行的第8 届诺贝尔研讨会出版的论文集。

9. In his book The God Particle,Lederman gave two reasons for this name: ‘One,the publisher wouldn’t let us call it the Goddamn Particle,though that might be a more appropriate title,given its villainous nature and the expense it is causing.And two,there is a connection,of sorts,to another book,a much older one’.Leon Lederman (with Dick Teresi),The God Particle: If the Universe is the Answer,What is the Question?,Bantam Press,London,1993,p.22.

10. Carlo Rovelli,Reality is Not What it Seems: The Journey to Quantum Gravity,Allen Lane,London,2016,p.110.

11. 茨威格称之为“ace”，即扑克牌中的“A ”。

12. In his Foreword to my book Higgs,Weinberg wrote: ‘Rather,I did not include quarks in the theory simply because in 1967 I just did not believe in quarks.No-one had ever observed a

quark,and it was hard to believe that this was because quarks are much heavier than observed particles like protons and neutrons,when these observed particles were supposed to be made of quarks.' See Jim Baggott,Higgs: The Invention and Discovery of the 'God' Particle,Oxford University Press,Oxford,2012,p.xx.

13. 赫拉德·特霍夫特在稍早一些的时候先得出了这一结论，并在1972年举办于法国马赛的一场小型会议上提到了它。他的同事库尔特·西曼齐克（Kurt Symanzik）敦促他早日发表这一结果："如果你不发表，就会被别人抢先了。"然而，特霍夫特没有采纳同事这一明智的建议。（注：Gerardus 't Hooft,in Les Prix Nobel: The Nobel Prizes 1999,ed.Tore Frängsmyr,Nobel Foundation,Stockholm,2000.Available online at https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1999/thooft-bio.html/）

第5章 创造宇宙的方程式

物理学不是一门适合所有人的学科。哪怕是对于愿意花一生中的三到四年时间取得一个物理学学位的学生而言，坦白来讲，这门学科里有些方面还是挺枯燥无味的。但有那么一小拨人投身物理学是因为他们深深着迷于物理现实深处的问题，迫切地想了解大自然的奥秘，这样的渴望深刻而强烈，自其诞生的那一天起就永不停止。对于他们来说，物理学本身就可以给他们带来丰厚的回报：只要你详细掌握爱因斯坦广义相对论的复杂计算方法，再上几门关于量子力学的课，你就能把它们应用在整个宇宙上了。

这可太棒了。

研究关于整个宇宙的物理学理论，属于物理学领域里的物理宇宙学分支。当然，从古希腊开始，哲学家就开始思索宇宙的本质了，还设计出了非常精密复杂的“天体力学”系统来描述天体的运动。牛顿证明，他提出的运动定律和万有引力定律适用于太阳系中的行星。然而，哪怕以20世纪的科学水平，将物理学理论拓展到整个宇宙的范围内都是闻所未闻的，物理学界同人也都对此抱有深深的疑虑。直到20世纪60年代，宇宙学才普遍被认为是一门正规的学科。

爱因斯坦完全理解自己钻研的是什么样的问题。1917年，就在他向普鲁士科学院提交关于广义相对论对宇宙学的影响的新论文的不久前，他给同事兼好友、奥地利理论物理学家保罗·埃伦费斯特（Paul Ehrenfest）写信说：“我……再次在引力理论上做了一件可能会让我被关进疯人院的事。”[注]

提出引力场方程两年之后，爱因斯坦仍然在寻找从物理上阐释马赫

原理的方法。如果水沿着牛顿的水桶壁上升是因为整个宇宙在绕着水桶旋转，那么惯性的起源只能追溯到宇宙本身的大尺度行为。

爱因斯坦首先得找出符合他的场方程的是哪种宇宙。牛顿的宇宙在空间上是无穷无尽的，但这就会带来一个问题：如果一个物体的惯性由宇宙中所有其他物体产生的累积效应决定，那无穷大的宇宙则意味着物体的惯性也是无穷大的。把马赫原理用在牛顿的无穷宇宙中，就意味着所有的东西都不会运动了。

但有限的宇宙会带来其他问题，其中尤为显著的问题就是，如果宇宙有“边界”，在边界处到达尽头，那宇宙边界之外还有些什么？为了避免这个问题，我们有必要设想宇宙在空间上有限，但又没有边界。乍一看这似乎在逻辑上无法实现——对于平直的宇宙而言这确实无法实现，但如今的爱因斯坦在处理弯曲的几何形状方面已经非常得心应手了。我们知道，地球是有限大的，它的质量可以估算出来（大约为6×10^{24}千克）。尽管从人类的角度看地面是平的，但我们都知道地球是一个球，因此它的表面没有边界。地球就是一个大小有限但没有边界的物体。

因此，爱因斯坦设想，宇宙的时空就像球的表面一样，发生了弯曲乃至闭合，这样它所包含的质能就是有限的。要注意的是，这里所说的“球”指的是四维时空中的球（数学家将四维球的表面称为三维球面，高维球面被统称为“超球面”，参见图11）。地球是三维空间中的球，它的表面被称为二维球面。如果我们能够在爱因斯坦的宇宙中沿着一条直线一直往前走，最终就会回到出发点。

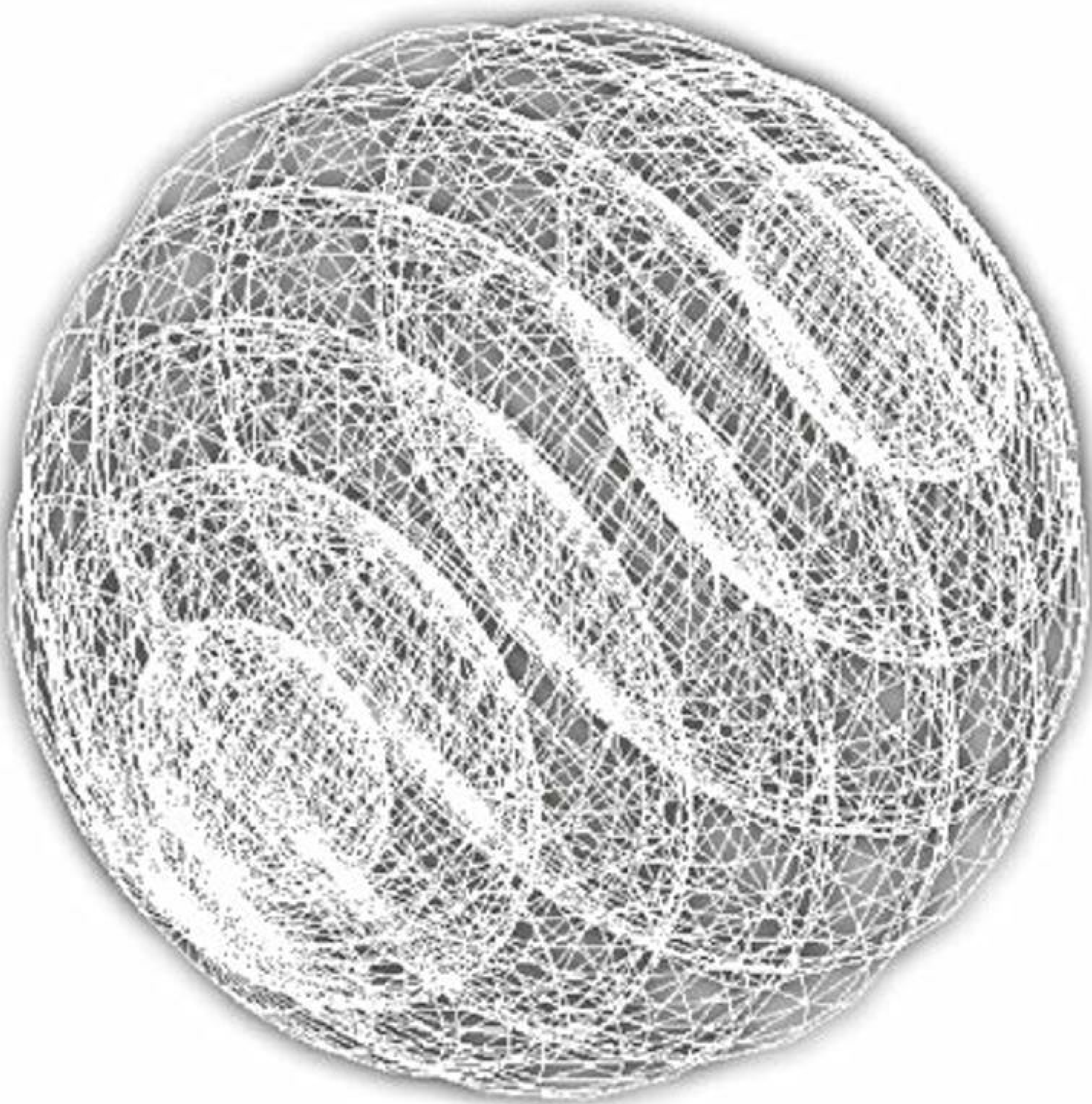


图11 这幅图画出了三维球面（或超球面）在三维空间中的投影。可以看出，它由一系列普通的球面（二维球面）堆叠而成，二维球面以其在二维平面上的投影表示

有趣的是，爱因斯坦并不是第一个设想有限但无边界的宇宙模型的人。卡洛·罗韦利发现，早在14世纪，伟大的意大利诗人但丁在博洛尼亚大学学习时就提出了这一设想。在《神曲》的第三部分“天堂篇”中，但丁描述了他升到最高天，即上帝和天使的住所的经历。在这个部分，但丁需要描述在宇宙的边缘看到的景象，而他选择的解决方法与500年后爱因斯坦的选择如出一辙：“但丁让宇宙拥有四个维度，通过这种我

们所知道的方式解决了问题。”[注]

提出宇宙模型以后，爱因斯坦遇到了另一个更难解决的问题。引力会让物体相互靠近，却不会让物体相互远离。电荷和磁极都各有两种，同性相斥异性相吸，但引力只能相吸不能相斥。从另一个角度说，质能弯曲时空的方式只会让物质相互靠近，不会让它们相互远离。

牛顿非常清楚这意味着什么。引力让物质相互吸引，这意味着无穷大的宇宙中所有的物质最终会无可避免地自发坍缩。他别无选择，只能在《原理》中提出，上帝在放置所有的恒星时让它们彼此间离得足够远，以避免发生这种灾难性的坍缩。[注]

几百年间的天文学观测没有发现恒星在相互靠近的证据，直到1917年，大多数人都认为宇宙是静态的，不是动态变化的——恒星的名称并不是没来由的。但爱因斯坦的场方程和牛顿的引力理论一样，没有证明宇宙是静态的。爱因斯坦需要一种物理学机制来充当牛顿笔下的上帝。

他的解决方法是引入一种让人很不满意的折中方案。引力场方程的左边描述了时空的弯曲程度，右边描述了由时空弯曲程度决定的质能的运动。尽管场方程取得了极大的成功，但爱因斯坦还是觉得这个方程“不平衡”。为了得到一个静态的宇宙，他尝试在方程左边引入一个新的项，给时空增加一个奇怪的排斥力，以与引力相抗衡。这种力相当于一个负的引力，它的值随着距离的增加而增加，以抵消方程右侧所有质能导致的弯曲效应。

爱因斯坦用希腊字母Λ（希腊语“lambda”）来表示这个新的项，并称之为“宇宙学常数”。通过仔细地选择Λ的值，爱因斯坦终于实现了完美的平衡：他得到了一个静态的宇宙。爱因斯坦承认他“不得不往场方程中引入一个不符合我们对引力的实际认知的扩展项”。[注]但在当时，爱因斯坦的做法看起来像是一个简洁的解决方案。宇宙学常数在短距离上并不影响广义相对论的机制，因此广义相对论的很多成功的预言都保

留了下来。

然而，爱因斯坦也犯了一些重大错误。问题不仅在于宇宙学常数缺乏真正的理论上的说服力，还在于它甚至都没有起到爱因斯坦所声称的效果。他在1917年的论文里描述的宇宙模型其实并不是静态的，而是相当不稳定的。人为修改场方程以后，爱因斯坦还是没能完全排除宇宙收缩或者膨胀的可能性。

14年后，爱因斯坦的静态宇宙被一系列事件推翻了。

1917年，人们认为可见宇宙只包含我们银河系中的几千亿颗恒星，它们与一种模糊弥散的天体（星云）一起零零散散地分布在空间中。当时，美国天文学家维斯托·斯里弗（Vesto Slipher）在亚利桑那州弗拉格斯塔夫的洛厄尔天文台工作，他在数年间持续利用多普勒效应[注]来研究星云之间的相互运动（参见图12）。他在收集了一些相关数据2发现，大多数星云都正在远离我们，其速度达到了惊人的1100千米每秒。

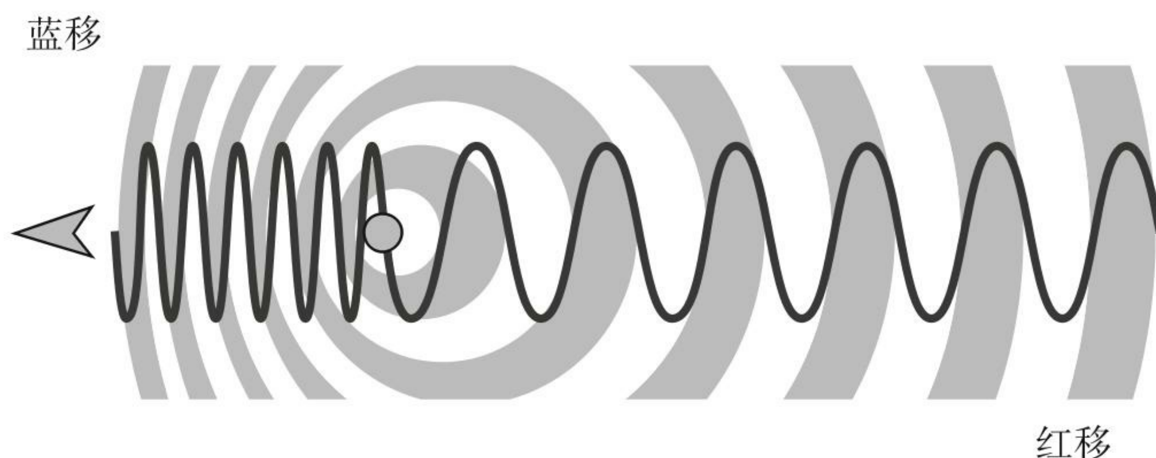


图12 假设有一个静止的物体发出了一道声波或一道光，其波长为λ。如果让这个物体运动起来，那么沿着物体运动的方向波就会被压缩，每个单位距离会有更多个周期，即波长变短；而与物体运动方向相反的方向波则会被拉伸，即每个单位的距离包含的周期数变少，亦即波长变长。这就是多普勒效应

因为这些星云在远离我们，所以它们发出的光会向频率更低或者波长更长的方向移动（也就是说光波被拉伸了）。在可见光谱上，频率最

低的是红光，频率最高的是紫光，向频率更低的方向移动也就是往光谱的红色一端移动，因此被称为红移。

有物理学家认为，这些星云不是我们银河系内的天体，而是与我们银河系一样的完整的星系，只是距离我们很远。1924年12月，美国天文学家埃德温·哈勃（Edwin Hubble）解决了这场争论，他估算出仙女座中的一片星云距离我们将近100万光年[注]。这一原本被称为大仙女座星云的天体，迅速被改名为仙女星系。这告诉我们，夜里可观测的宇宙可比我们想象的要大得多。

哈勃在加州帕萨迪那附近的威尔逊山天文台工作，在助手米尔顿·赫马森（Milton Humason）的协助下，他扩展了斯里弗的数据集，收录了更多星系的红移信息，最终发现星系与我们的距离和它们相对我们的移动速度之间有个简单得令人吃惊的关系，这个关系被称为哈勃定律。[注]星系距离我们越远，它远离我们的速度就越快，这种现象只有一个解释：宇宙根本不是静态的，它一直在膨胀。

大多数星系都在远离我们，并不表明我们位于宇宙的中心。在膨胀的宇宙中，膨胀的是时空本身，每个点与其他点的距离都在不断增加（见图13）。遥远星系发出的光发生的红移其实并不来自多普勒效应，而是光所在的空间本身膨胀了。这种红移又被称为宇宙学红移。



(a)



(b)

图13 想象一个星系在其中均匀分布的宇宙，灰色图案表示宇宙在某个时间点的星系分布，黑色图案表示在一段时间之后，宇宙又膨胀了一些以后的星系分布。（a）站在第2行第2列的星系角度看，它周围所有其他星系都在远离它，与其距离最远的星系移动的距离最远；（b）站在第3行第4列的星系角度看，结果也一样，其他所有的星系都在远离它，与之距离最远的星系移动的距离最远。由此可知，所有的星系都在远离我们，而这并不代表我们位于宇宙的中心

接受了宇宙在膨胀的证据，就意味着接受宇宙的演化历史。通过简单的外推就可以知道，在我们的过去一定有这么一个时刻，宇宙的质能被压缩在了一个无穷小的点（被称为“奇点”）中，而宇宙从这个奇点通过一场“爆炸”而诞生，这个过程被称为“大爆炸”（Big Bang）。

不是所有人都能接受这个想法。英国物理学家弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle）就是该理论的著名反对者，他倡导稳恒态宇宙模型，是“大爆炸”这个词的发明者，但他发明这个词是为了嘲笑大爆炸理论。不过，即便是稳恒态宇宙模型也不是静态的，该模型提出：随着时空在不断膨胀，新的物质也在不断地被创生出来，大尺度的可观测宇宙从而得以保持不变。

不管怎么样，爱因斯坦为了制造出一个静态宇宙而引入的宇宙学常数都毫无存在的必要，甚至有点儿令人尴尬。爱因斯坦后来也后悔在关于宇宙的方程上做了这个妥协，称引入它是自己一生中最大的错误。[注]

一开始，很少有人把宇宙的大爆炸起源说当真。但生于乌克兰、后来移居美国的物理学家乔治·伽莫夫（George Gamow）意识到，如果宇宙确实是通过大爆炸诞生的，它就一定会留下一些如今仍可观测到的痕迹。他与自己指导的博士后、美国人拉尔夫·阿尔弗（Ralph Alpher）一起，在1948年提出了一个模型，描述了大爆炸之后不久的“原初”宇宙中质子、中子和电子的核物理过程，并成功预言了宇宙中氢原子与氦原子的相对丰度。

物理学计算表明，在早期宇宙膨胀并冷却的同时，质子和中子会首先发生相互作用，形成小的原子核。然后，这些原子核会与自由电子相

结合，形成电中性的氢原子和氦原子，这一过程被称为“复合”（recombination）。

在这个时候，宇宙只是一团带电粒子组成的等离子体，电磁辐射在其中蹿来蹿去，形成了一团穿不透的迷雾。但在电子和质子结合产生电中性的氢原子（这一时期被称为复合时期）之后，这些电磁辐射就没有其他地方可去了，只能被释放出来。自此，迷雾消散，宇宙变得透明，而释放出来的电磁辐射形成了弥漫于宇宙各处的背景光辉。伽莫夫继续推进研究，在1948年的晚些时候发表了一篇论文，预测了宇宙在复合时期的物质与辐射密度。

但他的计算出了很大的差错，他的另一位同事罗伯特·赫尔曼（Robert Herman）和阿尔弗一起纠正了伽莫夫的计算，并预言复合时期释放出的辐射一直保留至今，并且弥漫在宇宙的每个角落，它有一个特征温度(注)，仅比绝对零度高上几度而已。在这个温度下，它的频率分布在电磁波谱上微波与红外线的范围内达到峰值。

1964年，射电天文学家阿尔诺·彭齐亚斯（Arno Penzias）和罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）在贝尔实验室位于新泽西州霍姆德尔的研究设施处意外探测到了宇宙背景辐射，这是一个广为人知的故事。他们当时正在尝试探测我们银河系中某团发光气体云所发出的微波辐射，但意外发现了一个显著的信号。这个信号在天空中任何一个方向都能探测到，被他们看作一种讨厌的“噪声”，掩盖住了他们想要研究的信号。最终，他们发现这个信号并不是噪声，而是真实存在的宇宙背景辐射。

宇宙背景辐射包含微波辐射和红外辐射，其平均温度为2.7开尔文，只比绝对零度高出不到3摄氏度。直到20世纪70年代末物理学家对它的了解还很少，但如今宇宙学已经被看作一门“正规的”学科了。

李·斯莫林从来没有上过关于物理宇宙学的正式课程，他关于宇宙学的知识都是根据需求自学的。从罕布什尔学院毕业后，他前往哈佛大

学进行博士阶段的学习，上了与量子场论、标准模型、群论相关的课程，还上了一门由斯坦利·德塞尔（Stanley Deser）讲授的关于量子引力的“专题课”[注]。他还上了拉乌尔·博特（Raoul Bott）和史蒂文·温伯格关于高等广义相对论的阅读课程，这门课是围绕着史蒂芬·霍金（Stephen Hawking）和乔治·埃利斯在1973年出版的专题著作《时空的大尺度结构》（*The Large Scale Structure of Space-time*）而展开的。1977年，温伯格出版了一本大众科普书，叫作《最初三分钟》（*The First Three Minutes*），这本书迅速跻身畅销榜。至此，大爆炸的概念已深入人心。

不过，虽然宇宙的大爆炸起源这一概念已深入人心，大爆炸理论显然还有很多问题。

我们有必要在这里稍作停留，总结一下一个关于宇宙的理论需要能做出哪些预言，或者至少罗列这一理论需要与哪些事实相自洽。我们已经知道宇宙很大，而且它在不断膨胀。就我们所知，宇宙的时空在局部是平直的，这就是为什么我们上学时必须要学欧几里得几何学。但这并不影响宇宙在大尺度上会呈现出球形的几何形状，正如我们周末观看的球赛所在的场地是平的，但这并不影响整个地球是圆的。

我们还希望宇宙理论能解释我们在宇宙中看到的东西：恒星、星系、行星，当然还有我们自己。不仅如此，当我们怀着敬意凝视夜空时，我们会发现宇宙从各个方向上看大体都是相同的。我们会看到恒星和模糊的光斑（如今我们知道它们是遥远的星系），还有空空如也的空间。宇宙的这种均匀性让人惊异。但哪怕是抓着你的手的小孩子都能告诉你，同样几个光点所组成的图案，从不同的方向上看到的样子是不同的。我们必须承认宇宙是自有其结构的，我们也希望关于宇宙的理论能够反映这种结构。

1917年，爱因斯坦提出宇宙是有限但无边界的。5年以后，苏俄物

理学家、数学家亚历山大·弗里德曼（Alexander Friedmann）得出了爱因斯坦场方程（不包含宇宙学常数）的三种类型的解，从而描述了三种类型的宇宙。

有限宇宙所带来的一个显然结果是，它在大爆炸之后的演化（及其最终命运）取决于它所包含的质能。如果宇宙包含的质能密度极高，它的膨胀速度就会减慢，发生一种“宇宙大刹车”，最终让宇宙自发坍缩成一个点。这类宇宙被称为“闭宇宙”。闭宇宙中的局部时空曲率是正的，就像上面的三角形内角和大于180度的球面一样。

相反，“开宇宙”含有的质能不足以阻止它膨胀，因此它会永恒膨胀下去，最终到达一种“热寂”状态，那时所有的物质和能量将完全均匀而稀薄地分布。这类宇宙的局部时空曲率是负的，就像上面的三角形内角和小于180度的马鞍的表面一样。

与我们宇宙的情况相符合的是弗里德曼提出的第三种宇宙，它既不是闭合的也不是开放的，局部时空完全是平直的，其曲率为零。但这样的宇宙所含有的质能密度必须刚刚好，既不过大也不过小，才能平衡膨胀速率。这类宇宙原则上是有可能存在的，但它意味着宇宙的参数经过了精细的调节，精巧到了令人震惊的程度。让质能密度增大$1/10^{14}$，宇宙在很早之前就坍缩了；而要是让质能密度减小$1/10^{14}$，宇宙中的物质就会消散得极快，以至于星系根本无法形成。

这个问题被称为“平直性问题”。[注]

20世纪70年代，对宇宙微波背景辐射的研究证实了其令人惊异的均匀性，但科学家很难解释它为什么这么均匀。我们知道，如果一个热的物体与一个冷的物体在一起接触，热量就会从热的物体流动到冷的物体上，最终使得两个物体的温度相等。但在宇宙的演化过程中，在复合时期（大爆炸之后约380000年）之后，物质之间就再也没有机会通过辐射

来交换能量了，因此我们没有理由假定如今宇宙中的物质和能量一定是均匀分布的。而如果物质和能量不均匀分布，我们观测到的各个方向上的宇宙背景辐射就一定会彼此不同。但事实情况并非如此。

这个问题被称为“视界问题”。

1979年，年轻的美国博士后研究员阿兰·古斯（Alan Guth）与同事戴自海（Henry Tye）在位于纽约州伊萨卡的康奈尔大学提出了一个理论，尝试解决这些问题（及其他一些问题）。在探索一个可能的解决方案会产生什么样的后果时，古斯意识到，如果宇宙在诞生的极早期把大量能量喷射到空间中，就会导致宇宙在短期内发生指数式膨胀。“我不记得自己曾经尝试过为这个不同寻常的过程起个名字，”他后来写道，“但我的日记显示，（1979年）12月底，我已经开始把这个过程叫作暴胀（inflation）了。”[注]

在暴胀宇宙模型中，早期宇宙含有多少质能，以及它是否具有临界密度以产生一个平直的时空都无关紧要。初始暴胀速率不重要，甚至发生暴胀的都不一定是整个早期宇宙，可能只是整个时空中的一个小泡泡。暴胀理论的拥护者认为，不管暴胀之前的时空形状如何，在暴胀之后，宇宙都会不可避免地变得平直。

暴胀理论并没有获得所有人的支持，直到如今，关于该理论的争论还很活跃。事实上，暴胀理论并没有真正解决平直性问题，只是把问题推到了大爆炸之初的瞬间。精细调节可能不再需要通过密度来实现，但仍暗示需要通过初始条件进行一定的选择。我们在第14章还会回到这个话题。

暴胀理论也为视界问题提供了一种解答。它认为，在暴胀开始的时候，宇宙的体积非常小，因此其中每个部分都与其他部分相连，在这一块很小的区域内宇宙是均匀的。而在暴胀过程中，整个宇宙带着这样的均匀性迅速扩张，因此最后形成的宇宙也是均匀的。也就是说，早在复

合时期，所有的物质和辐射就已经均匀分布了（这个说法存在一个问题，我在后文中会解释）。

现在，我们可以建立一个标准的大爆炸宇宙学模型，它所用的时空度规来自爱因斯坦场方程的精确解，描述了一个均匀的、不断膨胀的宇宙。这一时空度规被称为弗里德曼—勒梅特—罗伯逊—沃克（FLRW）标度，名字来自弗里德曼、比利时理论物理学家（兼牧师）乔治·勒梅特（Georges Lemaître）、美国物理学家霍华德·罗伯逊（Howard Robertson）和英国理论物理学家阿瑟·沃克（Arthur Walker）。

在这一模型的基础之上，我们增加了一个“慢滚”（slow roll）暴胀机制。慢滚暴胀与古斯一开始提出的机制大为不同，它由一种特定的量子场所激发，这种量子场被称为暴胀子（inflaton）场，它产生作用的方式在某种程度上类似于希格斯场。[注]慢滚暴胀为宇宙的平直性问题和视界问题做出了可能的解释，不过这方面还有一定的争议：有些物理学家认为根本就没有必要，或者不值得引入暴胀这一过程。

但紧接着，理论物理学家又遇到了一个巨大的障碍。宇宙暴胀可以解释为什么不管宇宙开始时包含多少质能，局部时空都是平直的，但它无法绕过这样一个事实：宇宙中现有的质能数量必须与哈勃定律推算出来的宇宙如今的膨胀速率相称。然而问题在于，天文学家发现可观测宇宙中的质能不足以支撑宇宙如今的膨胀速率。

这一宇宙模型也不能解释恒星与星系的形成过程，不过天文观测可以提供一些线索。像仙女星系这样的旋涡星系呈现出螺旋形，这表明它们在不断旋转，拖曳着由恒星、尘埃和气体组成的旋臂。在这类星系中，中心位置的恒星密度最高，这表明这里的引力场（即时空的弯曲程度）最强。靠近中心的恒星旋转的速度也比远端（这里的引力场更弱）的恒星快很多。但天文学家测量了旋涡星系边缘恒星的旋转速度，却发现它们的速度远大于以星系中可见恒星的质量推算的预测值。

最简单的解释是，除了可见的恒星之外，星系中还有很多我们看不见的物质。每个星系都处在一团看不见的物质中间。这种物质不可能是普通物质，因为我们可以通过电磁辐射谱中某一段频率的辐射观察到任何普通物质，但我们看不到它。这种物质跟粒子物理标准模型中的任何物质都不一样，它只能通过所受引力场的作用被感知到，我们把它称为“暗物质”（dark matter）。至于它到底是什么，我们一无所知。

暗物质极为神秘，又极为重要。根据剑桥大学天体物理学家西蒙·怀特（Simon White）和马丁·里斯（Martin Rees）于1978年首次提出的机制，暗物质通过彼此间的引力聚集在一起，把可见的普通物质包裹在它们的中心。[注]最终，在大爆炸之后几亿年左右，普通物质的密度到达了一个临界点，第一批恒星产生了，星系也随之产生。

但是，如果宇宙中暗物质的分布在一开始是完全均匀的，只偶尔夹杂着一些可见的普通物质，那么恒星和星系的产生就不可能很快。在这样的宇宙中，引力场也是完全均匀的，所有的物质受到的来自各个方向的引力都完全相等，因此它们会一直停留在原地，不会移动。这样一来，就没有推动更大的暗物质晕产生的动力了。这样的宇宙永远都不会产生我们宇宙中星系的大尺度结构：星系们排列成串、成墙，包围着巨大的“空洞”。

要促成星系形成，需要的不均匀扰动其实也不大。宇宙学家估计，只要早期宇宙中暗物质的分布出现十万分之一的不均匀性就足够了。

但这么小的不均匀性要如何产生呢？在古斯发表自己关于宇宙暴胀的想法后不久，包括古斯自己、史蒂芬·霍金和苏联理论物理学家阿列克谢·斯塔罗宾斯基（Alexei Starobinsky）在内等的多位物理学家提出，这些小的不均匀性可能来自暴胀子场中的量子涨落，它们被暴胀放大到了宇宙尺度。

如果他们的想法正确，这可是个不得了的结论。我们的可观测宇宙

之所以有这些大尺度结构，都要归功于大爆炸之后极短时间内发生的随机的量子涨落。

尽管这些不均匀性很小，它们还是会在宇宙背景辐射上留下一些蛛丝马迹，就像一起宇宙罪案留下的血手印一样。一系列卫星探测器——1989年发射的宇宙背景探测器（COBE）、2001年发射的威尔金森微波各向异性探测器（WMAP），以及2009年发射的普朗克卫星，已经以越来越高的精度绘制了宇宙背景辐射的分布图（见图14）。[注]这些分布图揭示了背景辐射温度的细微变化，温度差只有万分之几摄氏度，而这刚好代表着十万分之一的不均匀性！热斑（温度高的区域）表明，在复合时期，这些地方的物质密度稍稍高于平均值。这些位置即将成为暗物质聚集的“种子”，最终带来恒星与星系的形成。而冷斑（温度低的区域）说明在复合时期这些地方的物质密度低于平均值，这些地方后来则会变成巨洞。

对这些分布图的分析，为关于宇宙起源和演化的大部分（当然不是全部）理论提供了观测证据。

哪怕我们发现了暗物质（无论它是什么），也不能解决可观测宇宙中的质能不足以支撑宇宙如今的膨胀速率的问题。即使宇宙中的暗物质的量有可见物质的5倍之多，也仍不足以支撑宇宙的膨胀速率。宇宙仍然极度缺少质能，如今的膨胀速率所需要的总质能中，有高达70%是我们所不能解释的。理论物理学家开始在黑暗中喃喃自语，不断地猜测这意味着什么。

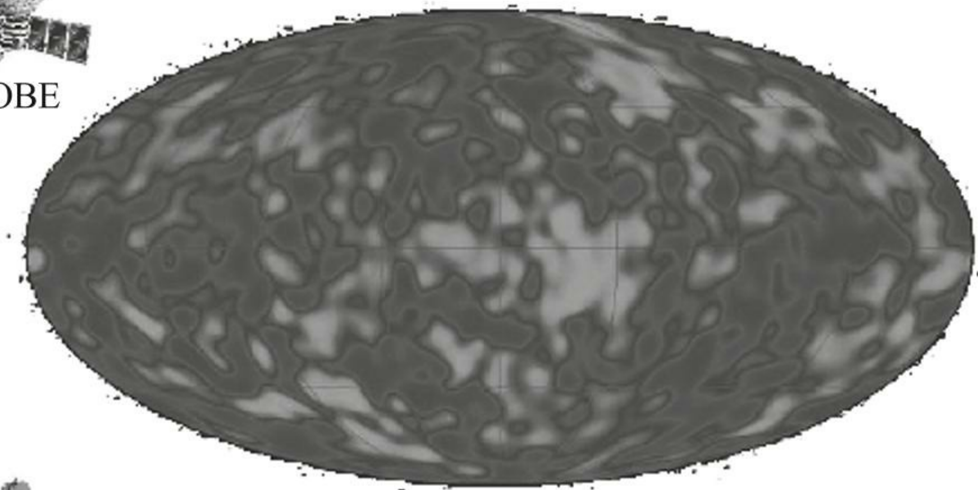
在1933年发表的一篇为大多数人所遗忘的艰涩文章中，勒梅特提出，宇宙之所以在膨胀，是因为我们以为空空如也的时空其实并不是空的。[注]

爱因斯坦曾经在场方程的左边加上了一个宇宙学项，作为对时空的修正。但如果我们把它从左边挪到右边，它就对整个宇宙的质能产生了

正的贡献。这不是与普通物质或暗物质有关的质能，它暗示空的时空本身就有一种能量，有时被称为真空能量。实际上，∧与真空能量的密度，即单位体积的“空”的时空里所含的能量成正比。

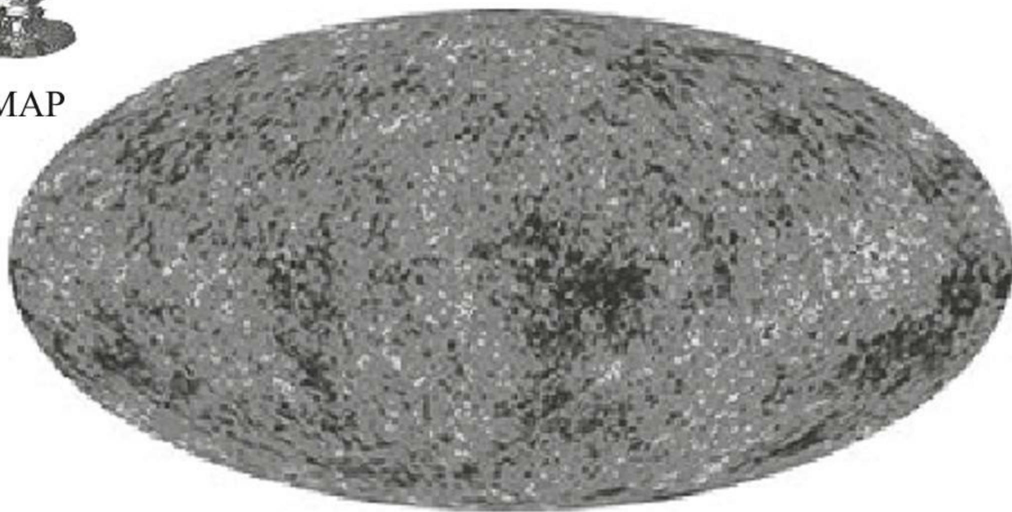


COBE





WMAP





普朗克卫星

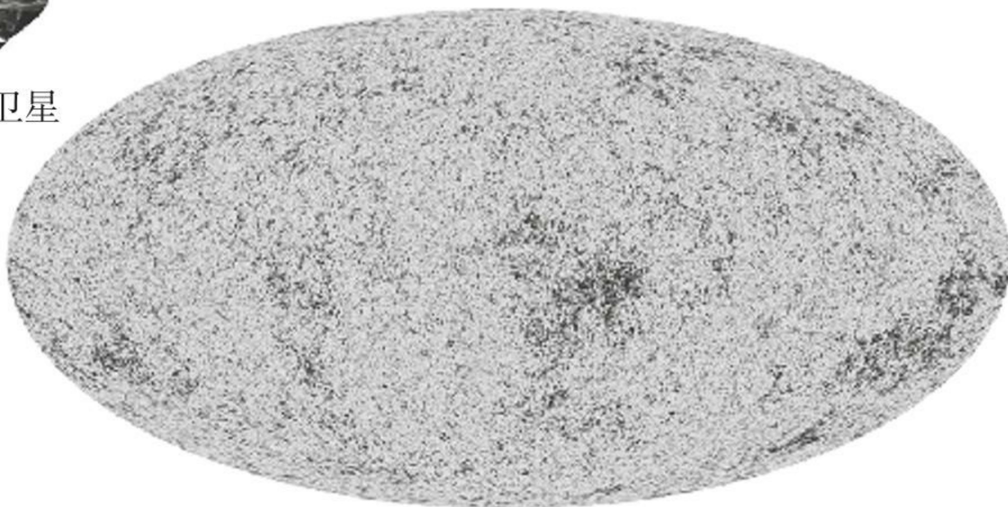


图14 由COBE、WMAP（为期9年的观测结果）和普朗克卫星得到的数据，分别绘制出的宇宙背景辐射温度分布全天图。辐射温度的差异的数量级为$\pm 2\times 10^{-4}$摄氏度，以不同的颜色（非真实颜色）绘示。从图中我们可以看到，随着新的观测卫星被投入使用，辐射温度分布图的角分辨率迅速提高

科学家无法想象这种真空能量是什么，于是把它称为“暗能量”（dark energy）。

如果一个宇宙包含暗能量，它的膨胀历史就与只包含物质的宇宙大为不同。这一点看起来似乎没有太大帮助，毕竟我们不能回溯历史来确定我们的宇宙的膨胀历史到底是怎样的。

但我们其实能通过某种途径回溯历史。光速是有限且固定的，当我们观察到来自宇宙中遥远地方的事件时，光已经在宇宙中走了很久的路了，因此遥远天体发出这些光的时候其实是很久之前。太阳离我们约1.5亿千米，光走过这段距离需要8分钟，因此我们看到的来自太阳的光，其实展现的是太阳在8分钟前的样子。以此类推，从仙女星系到达地球的光，展现的是仙女星系250万年前的模样。观察遥远地方发生的事件，帮助我们回溯了宇宙的历史。

但距离我们最遥远的星系也最为暗淡，这给我们精确测量与它们的距离带来了很大难度。只有一种情况除外，就是星系中有一颗恒星以超新星的形式发生壮观的爆发的时候。超新星爆发时，整个星系都会被短暂地照亮。

1998年，两个独立的天文学研究小组报告了对被某一特定种类的超新星照亮的遥远星系的观测结果。两个小组的结果都表明，与当时天文学家普遍所持的观点相反，我们所在的宇宙一直在加速膨胀。对此，暗能量是最显而易见的解释。

由于暗能量与宇宙学常数完全相同，曾经给爱因斯坦带来“污点”的宇宙学常数又回到了宇宙学方程中。这就是FLRW度规中的“L”（代表

勒梅特）部分。然而，爱因斯坦本人一定不会为这个转折而感到高兴。毕竟，他引入这个宇宙学项是为了尝试让宇宙静止，而今它反倒成了宇宙膨胀速率加快的原因。

关于大爆炸宇宙学，学界已经产生了一种共识，大家公认的版本被称为“协调模型”，有时也被称为“大爆炸宇宙学的标准模型”或∧–CDM模型，其中∧代表宇宙学常数，而CDM代表冷暗物质。(注)

∧–CDM模型有6个参数，科学家可以通过调整这6个参数的值来使该模型与观测结果（如宇宙背景辐射的温度分布，或对超新星的测量结果等）相一致。与普朗克卫星2015年2月公布的最新数据分析相一致的结果表明：宇宙诞生于138亿年前，暗能量占据了宇宙质能密度的69.1%，暗物质占据了26.0%，而普通的可见物质——我们不久以前还以为整个宇宙就只由它们组成——只占据4.9%。

虽然对于那95.1%我们还一无所知，但我们已知的部分已经很惊人了。“我们能够细致地重现宇宙的历史，从初始的高温高压状态开始，”罗韦利兴奋地说，“我们知道原子、元素、星系和恒星是如何形成的，以及宇宙是如何一步一步演化成今天的样子的。”

为了超越我们已知的事实，尝试开始了解未知的事物，首先得做个深呼吸。现在，我们要做的，是沿着爱因斯坦在20世纪开创的道路，继续完成对空间与时间、物质与能量的认知革命。罗韦利说：“在140亿年前的那么一个时间点，物质和能量密度达到了普朗克尺度。在那时，广义相对论的方程不再适用，因为它无法再忽略量子力学效应。我们进入了量子引力的世界。”(注)

---

1. Albert Einstein,letter to Paul Ehrenfest,4 February 1917,quoted in Abraham Pais,Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein,Oxford University Press,Oxford,1982.The quote appears on p.285.

2. Mark A.Peterson,‘Dante and the 3-Sphere’,American Journal of Physics,47

(1979),1033.Dante’s solution was to extend the model to a fourth dimension determined by the speed of revolution of his heavenly spheres.

3. Newton wrote: ‘and lest the systems of the fixed stars should,by their gravity,fall on each other mutually,he ［God］ hath placed those systems at immense distances one from another.’ Isaac Newton,Mathematical Principles of Natural Philosophy,first American edition,trans.Andrew Motte,published by Daniel Adee,New York,1845,p.504.

4. Albert Einstein,‘Cosmological Considerations in the General Theory of Relativity’,Proceedings of the Prussian Academy of Sciences,142 (1917).Quoted in Walter Isaacson,Einstein: His Life and Universe,Simon & Shuster,New York,2007,p.255.

5. 当一个正在移动的物体发出波信号（如光或者声波）时，它的频率（或者音调）会随着它在接近还是远离我们，以及它接近或远离我们的速度而变化。如果你留意过救护车或者警车在疾驰经过我们前后发出的警笛声的变化，那么你应该对多普勒效应很熟悉了。

6. 1光年指光在一年里所走的距离，大约为95000亿千米。我们银河系的直径约为10万~12万光年，而仙女座星云距离我们将近100 万光年，因此它肯定位于银河系之外。

7. Hubble’s law is $v=H_0D$,where v is the speed of the galaxy,H0 is Hubble’s constant as measured in the present time,and D is the so-called ‘proper distance’ of the galaxy measured from the Earth,such that the speed is then given simply as the rate of change of this distance.Although it is often referred to as a ‘constant’,in truth the Hubble parameter varies with time depending on assumptions regarding the rate of expansion of the universe.

8. George Gamow wrote: ‘When I was discussing cosmological problems with Einstein he remarked that the introduction of the cosmological term was the biggest blunder he ever made in his life.’ George Gamow,My World Line: An Informal Autobiography,Viking Press,New York,1970,p.149.Quoted in Walter Isaacson,Einstein: His Life and Universe,Simon & Shuster,New York,2007,pp.355–6.

9. 你可能不太理解为什么辐射会有“温度”。其实，它表示的是发出这个辐射的物体的温度，通常会涵盖一个频率分布范围。对于微波背景辐射而言，它所对应的物体就是复合时期的那一团原子核与电子，温度在当时约为3000开尔文。之后，宇宙迅速膨胀，使这一辐射冷却到如今的温度。在我们常用的摄氏温标下，水结冰时的温度为0℃，水沸腾时的温度为100℃；而在开尔文温标下，0开尔文对应的是绝对零度，即–273.15 ℃。

10. 斯莫林参与的第一项研究（以及发表的第一篇论文）就是关于用量子色动力学的研究技巧来建立离散量子引力理论的。我们会在第8 章介绍这部分内容。

11. 不过也有一些理论物理学家认为它根本就不是个问题。

12. Alan H.Guth,The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins,Vintage,London,1998,p.86.

13. 有些理论物理学家最近提出，这种暴胀子场跟希格斯场其实是一回事。

14. S.D.M.White and M.J.Rees,‘Core Condensation in Heavy Halos:A Two-Stage Theory for Galaxy Formation and Clustering’,Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,183 (1978),341–58.

15. COBE的全名是“COsmic Background Explorer”。WMAP的全名是“Wilkinson Microwave Anisotropy Probe”，它以COBE项目组成员、WMAP设计组的领头人戴维·威尔金森（David Wilkinson）的名字命名，威尔金斯在与癌症进行了漫长的斗争后于2002年去世。普朗克卫星（Planck satellite）则以德国物理学家马克斯·普朗克的名字命名。

16. Lemaître wrote: ‘Everything happens as though the energy in vacuo would be different from zero.’ G.Lemaître,‘L’univers en Expansion’,Annales de la Société Scientifique de Bruxelles,Serie ,53 (1933),51–85.Quoted in Harry Nussbaumer and Lydia Bieri,Discovering the Expanding Universe,Cambridge University Press,Cambridge,2009,p.171.

17. 协调模型其实并没有那么协调，关于该模型的几个方面都存在激烈的争论。这也不奇怪，毕竟，这个模型中的大部分是由我们几乎一无所知的事物所组成的。

18. Carlo Rovelli,Reality is Not What it Seems: The Journey to Quantum Gravity,Allen Lane,London,2016,pp.178–9.

第二部分 形式

第6章 要去那里，我就不会从这里出发㊟

粒子物理标准模型和大爆炸宇宙学都是人类智力取得的非凡胜利，我们理应对此感到自豪。标准模型以极高的精确度描述了物质与辐射的性质和行为——自希格斯玻色子被发现以来，高能物理领域还没有什么实验或观测结果是它不能解释（或不能适应）的。而大爆炸宇宙学则描述了宇宙的大尺度结构和宇宙的演化，它解答了我们所能提出的最博大的问题，而就在不久之前，我们还只能借助宗教文献来回答这些问题。

虽然我们有充分的理由欢欣鼓舞，但也不能就此得意忘形。这两个理论都充满了不能解释的漏洞，关于物理世界是如何构成的，还有很多问题是它们无法解答的。科学家的雄心壮志是建立只需要借助少量经验知识（甚至无须借助经验知识）的理论，可不管是粒子物理标准模型还是大爆炸宇宙学理论都还达不到这个目标。尽管它们都取得了巨大的成功，但从某种意义上说，它们都不足以让人满意。

哪怕我们暂时不考虑量子理论在关于物理现实的本质方面提出的一些令人不安的暗示，我们也必须接受这样一个事实：粒子物理标准模型的量子场论有很多事情完全没解释。标准模型完全没告诉我们基本物质粒子与载力粒子同希格斯场的作用强度是多少，因此它无法从第一性原理上计算这些粒子的质量。我们只能通过实验来测量这些粒子的质量，并人为地把它们插入方程中。同样，我们也不能通过理论来计算物质粒子之间相互作用的强度，只能直接通过实验测量之。

标准模型中的所有粒子都有与之对应的反粒子。反粒子的质量与它们对应的正粒子相同，而电荷相反，比如电子带一个负电荷（e^-），而正电子带一个正电荷（e^+）。粒子在与它们所对应的反粒子相撞时，会湮灭并产生高能量的光子，但如果把反粒子与所有正粒子完全隔离起

来，它们就能稳定存在。

然而，可观测宇宙看起来完全是由正物质组成的，而非反物质，更不是正物质与反物质的混合。如果宇宙在大爆炸的瞬间产生的物质与反物质一样多（这看起来是个很合理的假设），为什么物质和反物质没有瞬间湮灭，并留下一个充满光子却不剩任何物质的宇宙呢？看起来情况好像是，在宇宙早期，出于巧合或者出于某种必然的需求，物质与反物质的平衡被打破了，物质粒子比反物质粒子多了一些。如今已被广为接受的理论完全无法解释这一现象为何出现。

接下来还有暗物质之谜。暗物质在大爆炸宇宙学中是一个不可或缺的组分，但在粒子物理标准模型中却完全找不到它的位置。关于它，科学家做了许多猜想，也已经开始进行一些实验上的搜寻，但直到如今我们还完全不知道它到底是什么。鉴于我们只能通过其对普通物质和辐射的影响来探测它，我们甚至不能确定暗物质真的存在。

我们对暗能量，即“空的”时空所包含的能量的了解也同样贫乏，甚至在很多方面还要更糟糕一些。如今标准的大爆炸模型得出的宇宙学常数值表明，每立方厘米的真空所包含的能量的数量级为10^{-15}焦耳。你可能对于焦耳这个能量单位不太熟悉，不过在这里我们只关心数字就好。

我们可能会认为这个能量密度来自空的空间中的量子涨落[注]。计算过程很困难，但理论物理学家找到了一些方法来“重正化”结果，设定了一个人为的界限，去掉了高于这个界限的能量的贡献。从外表看，量子涨落给出的真空能密度是10^{105}焦耳每立方厘米，这个数字足足是宇宙学常数的10^{120}倍。我们要操心的已经不是是否需要宇宙学常数了，而是为什么它这么小。

事到如今，我们无法再对显而易见的事实视而不见了。粒子物理标

准模型是一系列量子场论的集合，它们能满足狭义相对论的要求，但仍然需要一个背景时空。它们预设了一个时空构造，描述量子尺度的微观物体在这个绝对时空“容器”中的性质与行为，这与牛顿物理学的绝对时空观在本质上并无多大差别。这个时空是被动的，对于正在展开的量子物理现象而言，它只是个沉默的看客。

相反，大爆炸宇宙学的标准模型是基于爱因斯坦的广义相对论构建的，它并不依赖于背景时空，无须预设一种时空构造。相反，时空本身可以作为一个动态变量，从该理论中导出。在大爆炸宇宙学中，时空不是被动的，而是主动的，它受质能影响，又影响质能，积极地参与着物理学过程。

广义相对论无疑是一个关于引力场（即时空）的理论，但它属于经典理论，而非量子理论。就像麦克斯韦的经典电磁场一样，广义相对论无法描述涨落、扰动和激发——这类现象可以用场量子来解释。在广义相对论中，不存在“场粒子”这种东西，一切关于引力场量子的理论依然是纯粹的假想。引力场量子被称为引力子（graviton），这个名字是狄拉克在1959年提出来的。

爱因斯坦对于广义相对论与量子力学不相容的情况再了解不过了。第2章中我们提到，1915年11月25日，爱因斯坦完成了在普鲁士科学院的4场讲座中的最后一场演讲，把他的广义相对论思想完全呈现出来。然而，没过几个月，他又回来向科学院解释，自己关于引力的新理论或许需要修正：

> 由于电子在原子内运动，它在辐射出电磁能量的同时也应该辐射出引力能量，哪怕只有足以忽略不计的一丁点儿。既然事实上大自然中的电子并没有辐射出引力能量，要为量子力学做出修正的就不仅仅是麦克斯韦电动力学，还有关于引力的新理论。[注]

如能将量子力学和广义相对论结合起来，我们就得到了一个关于引

力的量子场论，即引力的量子理论。它是关于时空本身的量子理论。

你也许很想知道，为什么在少了如此明显的一个成分的情况下，如今的粒子物理标准模型和大爆炸宇宙学仍然各自都很有效呢？答案很简单：这两个理论起作用的尺度相差极远。量子理论适用于亚原子核、亚原子、原子和分子的微观尺度，涉及的相互作用力相对较强；相反，广义相对论适用的主要是宏观物体，如人、火箭、行星、恒星、星系，以及整个宇宙。相对于粒子物理学中的力而言，时空弯曲所带来的引力极其微弱。

引力有这么弱吗？当你受到地球引力而摔倒在地，擦伤膝盖的时候，你可能不这么认为。但我们可以在家做一个简单的小实验来揭示引力和电磁力孰强孰弱，只需要以下简单步骤：

1. 在你面前的桌子上放一枚金属回形针。

2. 将一小块磁铁放在回形针的正上方，并慢慢向下放。

3. 在某一个位置，回形针会受到磁力作用而离开桌面，向上运动，被吸到磁铁的底面上。

恭喜你，看到回形针被吸上来的一刻，你就向自己证明了小磁铁对回形针产生的力，比整个地球对回形针施加的引力都大。

引力与电磁力这两种力的强度如此悬殊，这既是件好事又是件坏事。好处在于，在考虑基本粒子之间的相互作用时，我们可以忽略时空弯曲所带来的引力效应。基本粒子的质量太小，它们之间的引力极弱，根本无法产生什么实际上的影响（正如爱因斯坦所说，“哪怕只有足以忽略不计的一丁点儿”）。另一方面，我们可以用广义相对论描述行星、恒星、星系和宇宙的大尺度结构，而无须考虑量子力学中的力对构成它们的原子、电子和夸克有何影响。

但坏处在于，要使得引力展现出量子效应，我们就必须达到极小的尺度和极高的能量，而这远超我们所能设想的实验范围，现在不可能达到，未来很可能也达不到。[注]这就是卡洛·罗韦利在前一章末尾提到的普朗克尺度，这一尺度由一系列基本物理学常数的组合决定。[注]普朗克长度的数量级是10^{-35}米，只有质子半径的$1/10^{18}$；普朗克能量比欧洲核子研究组织的大型强子对撞机（LHC）中质子–质子对撞能量还要大10^{15}倍，而后者已经是到目前为止地球上所能创造出的最高能量了。

我们推测，宇宙在大爆炸之后很短的时间内经历过普朗克尺度，但这已经是138亿年前的事情了。实验物理学永远无法达到接近这个级别的尺度与能量，因此我们也许不禁要问自己：为什么要操心这件事呢？当研究对象是基本粒子时我们用量子力学，当研究对象是大质量物体和宇宙时用广义相对论，一切就都挺好的。然而，我们知道这样并不能解决所有问题，而且在原则上总应该存在某种包罗万象的理论，能统一地描述任何事物。此外我们深深怀疑，在广义相对论和量子力学中处理时空构造的方式差异过大，可能是两者不能兼容的部分原因。

举例来说，费曼就认为没有必要去探讨能量高到如此程度的情况。他认为，只要我们逐步提高实验的精度，那么有朝一日我们总能在实验室里观察到量子引力效应。

不管怎么样，引力的量子理论在我们对大自然的现有描述中总是缺失的，因此，对于很多理论物理学家来说，建立这样一个理论具有难以抵挡的诱惑。早在1930年，就有三位物理学家各自独立开始尝试做这件事了——比利时物理学家莱昂·罗森菲尔德（Léon Rosenfeld）、苏联物理学家马特维·布龙斯坦（Matvei Bronstein）和泡利。他们的尝试当然是很不成熟的，也因遇到了量子场论早期发展时遇到的同样的问题而备受挫折。

物理学家意识到，有两条主要的途径可以帮助我们从现有的量子理

论和广义相对论这两个截然不同的理论走向统一的引力的量子理论。

如今，在某种程度上，物理力学就像财务会计一样。会计的目标是让账本中在企业、客户和供应商之间流动的钱取得平衡，而物理学家的目标则是平衡不同的物理系统或状态之间的能量流动。有一条“放之宇宙而皆准”的基本定律是，能量永远是守恒的。虽然能量会在不同的粒子和力上表现出来，但它有两种基本的形式：动能和势能。

动能很简单，就是与运动有关的能量，势能的定义则更难理解一些。势能表示的是储存或隐藏在某个系统里的能量。要理解势能，一个好办法是想象一个钟摆来回摆动，它沿弧线摆动到左侧，在到达最高点的过程中逐渐变慢。钟摆在最高点短暂停留了一下，在这一瞬间，它含有的所有能量都变成了势能。然后，受引力的作用，钟摆的运动方向发生改变，开始向右往回落，并逐渐加速，这时，它的势能就转回了动能。原则上，钟摆可以永远摆动下去，但钟摆本身的机械摩擦和空气阻力会慢慢地消耗能量，所以钟摆最终总会停下来。

在牛顿之后，物理学家进一步阐释了经典力学，在势能与牛顿理论中力的概念之间建立了一种直接的联系，知道这一点也许会对我们的理解有所帮助。在钟摆摆动轨迹的最高点，势能曲线（即势能随着钟摆位置变化的曲线）最陡，也正是此处钟摆受到的力最大。

如果动能代表利润表，那么势能就代表资产负债表。为了全面描述一家企业的财务健康状况，这两方面都需要考虑。[注]在力学系统中，动能与势能的和被称为系统的哈密顿量（Hamiltonian），这个名字来自19世纪爱尔兰物理学家、数学家威廉·罗恩·哈密顿（William Rowan Hamilton）。

狄拉克成功找到了一个发展量子场论的方法。从一个经典场（如麦克斯韦的电磁场）开始，推导出它的总能量，即哈密顿量，然后用一两种数学小技巧给它调上一点儿量子“风味”——把经典性质转化为与之对

应的量子性质，并引入可以被创造和消灭的场量子，在整个过程中仍然保持经典理论的形式结构。

这种方法被称为正则量子化。通过正则量子化，狄拉克得到了量子场论的很好的第一近似，并且它与经典理论等价。这一方法正是狄拉克《量子力学讲义》一书的主题。

通往量子引力理论的第一条路采用的正是狄拉克的这个方法。我们从广义相对论开始，把爱因斯坦的引力场方程改写成由一系列经典哈密顿量组成的方程，它就好像某种垫脚石。广义相对论的这种动力学呈现方式有时被称为几何动力学，与电动力学对应。然后，我们再用正则量子化调味，就得到了量子几何动力学，与量子电动力学相对应。这种方法被称为量子引力的正则方法。

但在广义相对论中，时空的本质是主动的，并非像在电磁学中那样只是个被动的背景。在广义相对论中，“这里”“那里”“现在”“当时”这样的提法都是毫无意义的，广义相对论只讨论与时空间距有关的问题。我们可能会认为，既然在广义相对论中，时间与空间的4个维度是平等的，那么广义相对论的动力学理论也应该包含这4个维度——三维空间、一维时间上的所有变化。

然而，狄拉克自己在20世纪50年代末沿着这条途径探索了一下。他发现，在这种被称为广义相对论的约束哈密顿量表述方法的理论中，动力学过程只受四维时空间距中3个维度的控制。只要3个维度，就包含了关于所有质能身上会发生的所有事情的信息，就同普通三维空间中的间距一样。

以这种方式重构广义相对论，就拆散了四维时空，产生了一个“3+1”的结构。时间实际上并没有消失，只是变得格外神秘而难以捉摸。实际上，空间几何中关系的变换在这种理论中可以被诠释为时间中不同的时刻，在这种情况下应用正则量子化意味着我们只是把空间量子

化了，而不是整个时空。狄拉克表示："这个结果让我不禁开始怀疑，物理学对4个维度的要求到底有多基本。"㊟

尽管狄拉克对数学计算了如指掌，他也没能在解决这个问题的道路上更进一步。他在《量子力学讲义》中总结了该理论的状况：

近年来，人们做了一定程度的努力，想把引力场统一到量子理论中来，但我认为这一工作的主要目标应该是通过把引力场统一到量子理论中来解决一些难题。然而，我们可以看到，这一希望并不能实现，尝试把引力场与量子理论相结合不仅不能解决问题，反倒会带来更多的问题。㊟

1959年，查尔斯·米斯纳和美国物理学家理查德·阿尔诺威特（Richard Arnowitt）和斯坦利·德塞尔共同发表了一项工作，提出了对广义相对论的约束哈密顿量表述方法的详细阐述——后来被称为ADM表述。1966年，当时在普林斯顿高等研究院工作的布赖斯·德威特用ADM表述构造了在简单弗里德曼宇宙情况下的正则量子场论。

这是宇宙学的首个量子理论。

"整个宇宙的波函数"这样的提法首次出现在了科学文献中。德威特发现，这个波函数只依赖于空间的几何形状，时间仍然难以捉摸。这个波函数描述了一个静态的宇宙模型，总能量为零。德威特写道："于是我们可以得出结论：在这样一个量子的几何动力学模型中，一切都不会发生，量子理论只会产生一个静态世界的图像。"㊟为了让事件能够在这个宇宙中发生，他需要找到一种方法重新引入时间，通过把表示不同量子空间态的多个波函数叠加起来并使其演化的方式来实现。

德威特并不是特别清楚应该怎么解释"整个宇宙的波函数"这一概念，因此，为了给自己开脱，他引用了历史上的先例。薛定谔在解释氢原子中电子的波函数时遇到过类似的问题。对于氢原子中的电子而言，

波函数——尤其是玻恩的“概率波”诠释已经被吸收进量子理论的哥本哈根诠释之中。但德威特指出，在量子引力理论中，哥本哈根诠释已经帮不上忙了：

> 哥本哈根观点要求预先存在一个“经典世界”，所有的观测都基于经典世界而进行。然而，对于引力理论而言，整个宇宙都是观察对象，不存在某个经典的“上帝视角”。因此，就需要从头开始研究诠释问题。[注]

如果我们假设所有存在的事物都位于宇宙的内部，那么在宇宙之外就不可能存在某种经典的“测量仪器”来测量整个宇宙波函数的坍缩。出于这个理由，德威特成为量子理论多世界诠释忠实的拥护者，因为多世界诠释无须借助波函数坍缩来解释量子现象，只会让我们对平行世界中所有其他的格温妮丝·帕特洛的命运浮想联翩。

德威特将爱因斯坦的广义相对论与薛定谔的波动力学结合起来，得到了一个方程，他称之为爱因斯坦–薛定谔方程[注]。惠勒为推广德威特的这个方程做了很多努力，因此大家也把它称作惠勒–德威特方程。

但这个方程并不能一劳永逸。在最好的情况下，惠勒–德威特方程也只代表了通往量子引力理论之路上的一个可以中途停留的站点而已，而且这一站离最终的目的地还相当遥远。惠勒–德威特方程其实包含一系列的无穷多个方程，而且充满了技术上的困难，以至于理论物理学家根本无法得到它的解。讨论宇宙的波函数完全没问题，但显然短时间内没有人能写出这样一个波函数的形式。罗韦利后来承认：“（惠勒–德威特方程）有很多问题：其数学基础定义不清，而物理意义又晦涩难懂。”[注]

学界对量子引力理论的关注度逐渐降低。不管怎样，20世纪60年代末到70年代都是高能粒子物理学的黄金时代。在这一时期的最后，粒子物理标准模型已基本建立起来，只等着对撞机实验来发现剩余未被发现

的粒子，从而填补空缺。

而粒子理论物理学家已经开始从一个完全不同的角度来看待问题。

通往量子引力的另一条路，是沿着量子场论的方向走，看看能不能使它遵循爱因斯坦的广义协变性，即从量子场论开始，努力让它不依赖于时空背景。这种方法被称为量子引力的协变方法。

在这种方法中，量子场论的技巧处于首要位置，它们此前在建立粒子物理标准模型时已经成功起到了作用。量子场论的技巧需要把广义相对论的时空度规分解成两个成分：其一是被动的、平直的闵可夫斯基时空，不含有引力场；其二是描述整个时空略微偏离平直空间的部分，它代表了引力子场的涨落。这样一来，引力场就被量子化了，引力子可以在平直时空中传播。这一方法的早期结果看起来相当振奋人心，得到的引力子所拥有的性质恰好符合人们对它的预期。

费曼自己也加入了比赛，把他成功应用到QED中的方法用在了引力上。当时的理论物理学家致力于计算所有能让理论重正化的重要辐射修正，德威特也做出了重要贡献。然而，物理学家很快发现，这样构建出的量子引力理论根本无法被重正化。20世纪70年代末，有好几位物理学家尝试解决这一问题，但没有人成功。

不过，费曼并没有完全失去斗志。他说：

*我对自己统一引力和量子力学的尝试并非完全不满意。我接受这一……产生的任何结果，主要是它无法被重正化……我一直都认为这意味着我们走得太远了：当我们回到极短的距离时，世界会变得大不一样。*注

但如果一直把量子场放在首要位置上，协变方法就牺牲了引力与时空几何学之间的深层连接，而这正是广义相对论的核心。而那些把自己

的一生都投入到广义相对论研究中的物理学家，也不喜欢量子场论研究者不得不依赖的重正化方法。

尽管有些理论物理学家承认同时从事多条线路的研究有其好处，但在量子引力方面，已知的这两种方法在概念上有很深的鸿沟，彼此之间也缺乏共同的基础。正则方法强调几何，而这“在广义相对论与基本粒子理论之间制造了一种分裂”[注]。而粒子物理学理论非凡的成功，以及大众对该领域日益增长的兴趣，让粒子物理学家深信协变方法是唯一的理性途径。

这就是李·斯莫林和卡洛·罗韦利在进入本科最后一年学习时所面临的状况。

爱因斯坦的自述不仅鼓励了年轻的斯莫林成为一名理论物理学家，也鼓励了他将建立量子引力理论作为自己的事业。在哈佛念研究生的时候，斯莫林想学习量子场论，以“偷取”其成功建立粒子物理标准模型的数学技巧，并把该技巧用在量子引力理论上。但老师们都不建议他选择这一课题，认为“只有傻瓜才研究这个问题”[注]。他的毕业论文导师悉尼·科尔曼（Sydney Coleman）就努力说服他换个课题，但斯莫林不屈不挠，与导师争论——这甚至都谈不上是争论。科尔曼告诉斯莫林，他给斯莫林两年时间想一个思路出来，否则就让他去做另一个关于QCD的课题。

不过，科尔曼也帮了斯莫林一个大忙：他请来斯坦利·德塞尔与自己共同指导斯莫林的研究工作。

罗韦利是在博洛尼亚大学进行本科最后一年的学习的时候了解量子引力问题的。有人给了他一篇论文的复印件，这篇论文的作者是伦敦帝国理工学院的英国物理学家克里斯·艾沙姆（Chris Isham），论文发表于1974年在英国核能研究机构（位于牛津附近的哈韦尔）举行的关于量子引力新进展的研讨会上。

从艾沙姆的介绍性论文中可以清楚地看出，量子引力理论遇到了看似无法解决的问题，形势让人极为困惑，几乎看不到任何希望。然而，当时的罗韦利抱有一种年轻人的孤勇，他内心的哲学家被研究时空概念的想法深深地吸引了，毕竟时空的概念正处于科学理解的边缘。

罗韦利的老师尝试让他放弃，告诉他花这么多年研究这么一个既深奥难懂又没有什么产出的课题，意味着毕业后几乎肯定找不到工作。不过，跟斯莫林一样，罗韦利对老师的反对不为所动，他说："通常来讲，大人们谨慎的建议的唯一作用，是让乐观的年轻人更加固执地要做自己想做的事情。"[注]

罗韦利与一些同为学生的朋友一起编辑了一本书，讲述博洛尼亚1977年3月发生的事件：一名年轻的激进主义者被杀，艾丽斯电台被迫停止广播，随后是持续几天的示威游行，封堵了街道，造成了骚乱。罗韦利因言获罪，他被逮捕了，还在当地警察局遭遇拷打。

虽然罗韦利在学生政治运动上投入了很多时间，但他仍然在思考量子引力问题，不久之后又去了帕多瓦大学读博士。罗韦利幸运地找到了一个给了他充分自由的导师，让他能研究一切自己想研究的东西。在与他同届的研究生纷纷发表自己的第一篇论文时，罗韦利还在埋头苦学。

在这个阶段，他只想理解自己尝试研究的问题。

---

1. 这一章的标题来自一个英国老笑话：一个城里人开车在乡下迷了路，问当地人如何回到城里。当地人解释了好久都没解释清楚怎么走，最后无奈地说："要去那里，是我的话就不会从这里出发。"——译者注

2. 严格来说，这种量子涨落并不是随着时间的波动现象，而是指这样一个相关现象：真空场的能量不能为零（其原因我们在第4 章讨论过），其平均值必须为一个大于零的值，被称为零点能。所有不同的量子场的零点能加起来，就是对真空能密度的理论估算值。

3. Albert Einstein,'Approximative Integration of the Field Equations of Gravitation',Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin) Sitzungsberichte(1916),688–

96.Quoted in Gennady E.Gorelik and Viktor Ya.Frenkel,Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties,Birkhäuser Verlag,Basel,1994.The quote appears on p.86.

4. 在科学上，关于此还有更多的问题需要澄清，第14 章会进一步讨论。

5. The Planck scale is defined by combining the values of the three fundamental physical constants that are central to quantum theory and relativity.These are the reduced Planck constant $\hbar$ (Planck’s constant h divided by 2 π—quantum theory),the speed of light c(special relativity),and Newton’s gravitational constant,G (which makes an appearance in general relativity).The Planck length,given by $\sqrt{\hbar G/c^3}$,has the value 1.6×10^{-35} metres.The Planck time, $\sqrt{\hbar G/c^5}$,is the time taken for light to travel the Planck length,or 5.4×10^{-44} seconds.The Planck mass, $\sqrt{\hbar c/G}$,is about 2.2×10^{-8} kilograms,or about 0.02 milligrams.From the Planck mass we deduce the Planck energy using $E=mc^2$,giving $\sqrt{\hbar c^5/G}$,which is about 2.0×109 joules,or about 0.5 mega-watt hours.This is approximately equivalent to the amount of electricity consumed by an average American in 12 days.

6. 对企业会计有所了解的读者还会知道，一家企业的存亡依赖于它的现金流，而现金流由利润表和资产负债表共同决定。

7. Paul Dirac,Süddeutsche Zeitung,18 October 1963,quoted in Julian Barbour,The End of Time: The Next Revolution in Our Understanding of the Universe,Phoenix,London,2000.The quote appears on p.2.

8. Paul A.M.Dirac,Lectures on Quantum Mechanics,Dover,New York,2001 (first published 1964),p.4

9. Bryce DeWitt,‘Quantum Theory of Gravity.I.The Canonical Theory’,Physical Review,160 (1967),1119.

10. Ibid.,1131.

11. 他私下里经常称其为“那该死的方程”。

12. Carlo Rovelli,What is Time? What is Space?,manuscript translated by J.C.van den Berg,p.11.Published by de Renzo Editore,Rome,2006.

13. Richard Feynman,Interviews and conversations with Jagdish Mehra,in Pasadena,California,January 1988,quoted in Jagdish Mehra,The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman,Oxford University Press,Oxford,1994.The quote appears on p.507.

14. Steven Weinberg,Gravitation and Cosmology,John Wiley & Sons,New York,1972.Quoted in Abhay Ashtekar,‘The Winding Road to Quantum Gravity’,Current Science,89 (2005),2066.

15. Lee Smolin,Three Roads to Quantum Gravity: A New Understanding of Space,Time and the Universe,Phoenix,London,2001,p.6.

16. Rovelli,What is Time?,p.6.

第7章 魔鬼祖母的礼物

其实，理论物理学家并不是对着一张空白的草稿纸，或者一块空白的黑板开始工作的。可以用来描述基本粒子或整个宇宙的物理学理论，在数学结构上可能有多种可能性，但并不是无穷无尽的。而且，尽管命运青睐具有叛逆思维的人，但先从我们已经了解的数学结构开始总归是有好处的。在革命中，斗争双方用的总是当代的武器。

想象一个理论的诞生过程并没有那么困难。过去，当已经有了很多未得到解释的经验数据的时候，科学家会努力使用熟悉的、在数学上可行的概念，如点粒子（所有的质量都集中在其中心一个无穷小的点上）、无限延伸的三维场、旋涡物体的运动和振动，等等。他们尝试以此构造出一个理论，不仅要看它能否拟合现有的数据，还要看它能否预言一些新的而且最好不同寻常的事实，以便将来通过实验和观测来验证。

如果新的数据不那么容易得到，科学家可能会尝试引入一些新的概念，构造出一个新理论，以填平理解上的鸿沟，更好地解释（即合理化）现有数据。有时候，这个过程需要对已经存在的理论概念进行全新的诠释：我们以为这个概念是这个意思，结果它代表完全不同的另一种意思。

或者，理论物理学家会从一个大想法出发，来梳理各种尝试预测大自然的理论。理论物理学家沉浸在内心的形而上学思考中，就像古希腊的哲学家一样。他们不停地问自己“如果这样或那样，会怎么样呢？”之类的问题。他们尝试用久经考验的数学结构来探索可能的答案，或者只是跟随问题本身的数学逻辑，看逻辑能把他们引领到哪里。

构建粒子物理标准模型的场理论有很多，20世纪70年代的理论物理

学界对此也很兴奋，很多物理学家认为这是个绝佳的起点。

既然弱力和电磁力已经被成功统一起来，下一个问题就很明显了。如果我们把强色力也统一进来，形成一种“电核力”呢？这就意味着，原子内部的所有量子场和作用力都只是一个具有更高对称性的、更宏大的统一的场在对称性破缺之后残留的碎片。

但我们不要就此停下，不妨思考一下：如果物质粒子（费米子）与力粒子（玻色子）之间存在一种对称性，使得标准模型中的每种粒子都有一种对应的粒子，就像每种粒子都有与之对应的反粒子一样呢？如果真正最基本的物理实体根本不是粒子，而是一维、二维甚至更高维度的能量细丝（它们被称为弦）呢？

一些理论物理学家认为，为了追寻大自然的奥秘，我们需要放飞想象力——就算不至于狂野，也得很活跃才行。伟大的想法固然要受到它要解释的现象背后的物理学定律的限制，但要引领科学思考上的革命，你就不能畏首畏尾。

这一伟大的想法不可避免地带来了一些不容忽视的副作用。

理论物理学家就像在一丛极为茂密的复杂数学公式的森林中寻找猎物，很容易就会迷路（就像爱因斯坦在计算张量积分时一样），一不小心更是会丧失目标。一开始，他们迫切地追寻在数学上有意义的结果，不断地引入更为深奥的概念，以至于后来所有人都难以给这些概念赋予物理意义或者诠释。不过这并没有（也不会）给他们造成困扰，因为他们寻找的只是一个可以自洽的结构。理论物理学家并不关心普通大众能否理解，更不关心大众对此是否满意（或者概念是否易于普及）。

但第二个副作用就真的带来了严重的问题，它涉及我们对“理论”一词的理解。在日常对话中，我们对这个词的定义是十分宽泛的——关于为什么2016年6月英国公民投票脱欧，以及为什么当年晚些时候唐纳德·

特朗普被选为美国第45届总统，我可以说自己有一个理论，我们都认同“这只是一个理论”。

然而，对于科学家来说，成功的理论所包含的东西要比这多得多。尽管它们的概念有时可能有些难理解，但这些理论告诉我们关于大自然如何运行的深刻含义。牛顿力学系统、达尔文的进化论、爱因斯坦的狭义和广义相对论，以及量子力学，它们都是被广为接受的理论，在其被提出的时代背景下都被认为是对现实的真实描述。在它们的基础之上，我们才了解到宇宙是如何演化的，才知道自己处于宇宙中的这个位置，从而建立理论。在复杂的西方科技文化中，我们很大程度上认为应用一系列可靠的科学理论是理所当然的事，有充分而可靠的理由相信它们。

细胞生物学家肯尼思·R.米勒（Kenneth R.Miller）曾解释，科学理论“并不是靠直觉或猜测建立起来的。一个理论是一系列解释，把一整束事实捆在了一起。它不仅能够解释那些事实，还能预言其他观测或实验将会得到的结果”。㊟

因此，我们可以把新的伟大的想法包裹在一个合适的数学结构外面，但如果我们不能证明它能与事实产生某些有用的联系，它就只能被称为一个科学假设，而非一个成熟的理论。不能以经验数据为基础的“理论”，其地位要低于经典的理论。

然而，哪怕是科学家，也仍然在使用“理论”一词的宽泛定义。不仅如此，在过去的几十年里，在真实世界中找到新的经验数据来证实令人兴奋的新猜想变得越来越困难，有些物理学家甚至因此流露出了降低“成功理论”的标准的倾向，尤其是那些雄心勃勃地要建立一个所谓的“万物理论”的理论物理学家。

20世纪70年代早期和中期，物理学家尝试把强色力、弱力和电磁力统一起来，建立一个大统一理论。他们的这些尝试正是一个绝佳例子，表明了一项理论进展应当如何起作用。虽然外观相似，但组成粒子物理

标准模型的几种场论彼此之间是独立而分离的。我们用QCD来研究夸克和胶子，用对称性破缺的电弱力场论来研究夸克与轻子之间的弱相互作用和电磁力。

这一切当然不能让人满意，物理学家开始寻找一种可以将所有这些场与力统一到一个框架下的场论。1974年，美国理论物理学家谢尔登·格拉肖和霍华德·乔治（Howard Georgi）宣布找到了这一理论。这类大统一理论比对称性破缺后的电弱理论拥有更高的对称性和更高的数学维度。人们想象宇宙中原本只有一种大统一力，它先分裂成了强色力和电弱力两种力，这一过程发生在大爆炸之后仅仅10^{-35}秒时，也许是由于与某种类似希格斯场的场发生了某种尚不明确的相互作用而导致的。(注) 随后，电弱对称性也因为与希格斯场的相互作用而被打破，产生了弱力和电磁力两种力，这一过程发生在大爆炸之后万亿分之一秒，即10^{-12}秒时。

大统一理论的出现看起来像是带来了一些进展，但引入更高的对称性带来了不可避免的结果，就是每个粒子都与其他所有粒子发生了某种关系，而这种关系是由假想中的“X玻色子”所传递的“电核力”主宰的。在电核对称性破缺后，这些关系中的一部分仍然保留了下来，根据乔治–格拉肖理论，这意味着质子中的夸克会发生一种特定的放射性衰变，将质子转化成一个电中性的π介子和一个正电子。

“然后我意识到，这个理论意味着原子的基本组分之一——质子是不稳定的，”乔治说道，“当时我感到十分沮丧，然后就上床睡觉了。” (注)

这正是一个尚处于推测阶段的理论应当做的事情：做出预言。乔治之所以感到沮丧，是因为他知道质子是稳定的。之后科学家又做了很多实验，包括在地下建造一个超大的水箱，在里面放满超纯水，希望能发现质子衰变的踪迹，但实验结果都清楚地表明，质子是稳定的，它的寿

命比乔治–格拉肖理论所预言的要长至少一万倍。注

物理学家尝试了其他的方法，但没有得到真正的解答。从1980年开始，科学家每年开一场科学会议，围绕着大统一理论的主题来讨论，但这系列会议到1989年就停办了，因为那时候理论物理学家的注意力又转向了别的地方。这正是我们所预期的结局：如果一个理论做出的预言被证明是错误的，这个理论最终就会被抛弃。科学家会从中得到一些经验教训，而物理学共同体还会继续前行。

“或许，为了有进展，我们得把引力加进来，”格拉肖承认，“爱因斯坦一直相信引力在其中扮演了重要角色，这是爱因斯坦的信念，也是在他生命最后的30年里，指引着他走向普林斯顿的花园小径深处的目标。”注

因此，我们得到了又一个伟大的想法。也许理论物理学家之前的野心有点儿太大了，还没有完全理解要统一的东西是什么，就急于尝试建立一个统一场论。不管怎么样，粒子物理标准模型自身就充满了问题，也许先尝试解决这些问题才是最好的选择。其中一个问题被称为“等级问题”，表现在对希格斯玻色子质量的计算上。

2012年7月，科学家在大型强子对撞机实验中发现了希格斯玻色子，这无疑是一场伟大的胜利。但建造这么大的对撞机，并不仅仅是为了产生让希格斯玻色子出现在大众视野中所需要的能量，还是为了在范围很广的一系列能量下探索。这么做的原因，除了希格斯玻色子是如此重要外，还在于在它被发现之前，没有人知道它的质量是多少。

这是因为，计算希格斯粒子质量的标准量子力学理论计算方法需要对粒子的裸质量进行辐射修正，由此实现重正化。这些修正需要考虑到希格斯玻色子在运动中经历的所有不同的过程，包括短暂地产生其他粒子及其反粒子之后又复合的虚过程。既然理论要求希格斯玻色子与其他粒子耦合的强度与其他粒子的质量成正比，那么可以想见，与很重的粒

子（如顶夸克）有关的虚过程一定占了希格斯粒子着衣质量[注]的很大一部分。

总而言之，这样一来，希格斯粒子的质量将会大大增加，达到普朗克质量的量级。普朗克质量约为0.02毫克，足有质子质量的10^{19}倍，这个质量的粒子足以用肉眼看到了！显然，一定有某些过程抵消了所有这些辐射修正，把希格斯粒子的质量“调整”回了我们最终在实验中测量到的值——大约是质子质量的133倍。

关于这一问题，有一些比较明显的解释。美国物理学家斯蒂芬·马丁（Stephen Martin）在2011年解释道：“希格斯粒子的质量中比较危险的大质量贡献被系统性地抵消了，这只能用存在某种阴谋来解释。用我们物理学家所熟知的词语来表示，这种阴谋就是对称性。”[注]

科学家讨论的这种对称性被称为超对称（supersymmetry）。超对称理论于20世纪70年代初由莫斯科和哈尔科夫的一群苏联物理学家首次提出，在1973年又由CERN的物理学家朱利叶斯·韦斯（Julius Wess）和布鲁诺·祖米诺（Bruno Zumino）再次独立发现。[注]请注意，超对称理论并不是大统一理论，把它看成一块重要的垫脚石比较合适。如果自然界被证明确实是超对称的，那么粒子物理现有的标准模型中的一部分问题（但并非全部问题）就能被解决，通往大统一理论的路也会变得更加清晰。

以超对称的假设为基础的理论在费米子与玻色子之间建立了一种基本的时空联系，这类理论不可避免地要产生更多的粒子。比方说，把超对称假设应用在目前的粒子物理标准模型上的最简单的理论叫作最小超对称标准模型（MSSM），该理论认为每个费米子都有一个对应的超对称费米子“伙伴”，称为超费米子（sfermion），它其实是个玻色子。电子的超对称伙伴被称为超电子（selectron），每个夸克都有一个超夸克（squark）伙伴。

同样，对于如今标准模型中的每一个玻色子，也有一个对应的超对称伙伴，被称为玻色微子（bosino），它其实是费米子。光子、W粒子和Z粒子的超对称伙伴分别被称为光微子（photino）、W微子（wino）和Z微子（zino）。注

假设粒子具有超对称性，就意味着与重费米子有关的辐射修正和与重超费米子有关的辐射修正会互相抵消。我几乎没有当数学家的经验，也完全没有数学家的能力，但以我有过的经验，可以这样举例：如果你在解一系列极为复杂的数学方程的时候，发现所有难处理的项全都被整齐地消掉了，得到的是一个有意义的数，这个时候你就会感受到最纯粹的喜悦。而这就是超对称理论所带来的结果：从原理上来看，希格斯玻色子的质量就稳定在一个合适的值上。

这类事情之前也发生过。物质粒子与反物质粒子就表明了自然界的一种对称性，但物质与反物质之间的对称性是“精确”的——带负电的电子与带正电的正电子之间除了电荷相反以外，其他任何表现都相同，质量也完全相等。而超对称则不是这样的，因为如果超对称是精确的对称，举例而言，超电子的质量就应该与电子完全相同，这就意味着超电子在大自然中的含量应该与正电子相同。注但如果真是这样，我们肯定早就发现超电子了。

显而易见，我们至今没有观察到任何超粒子。这说明如果大自然真的是超对称的，那这种超对称也应该是破缺的，让已知粒子的超粒子伙伴的质量大到了迄今为止人类建造的任何粒子对撞机都达不到的程度。注然而，究竟为什么会这样，我们还没有找到一个很好的理论解释。

大型强子对撞机所进行的实验已经基本上排除了最简单的超对称理论（比如MSSM）。如今，只包含一种超对称性的理论都需要引入120个额外参数，其中大多数都与自发超对称破缺有关，远远多于科学家理论上想要修正的标准模型包含的20多个参数。包含多种超对称性的理论

不仅遇到了参数的问题，而且让这些超对称性都自发破缺、回到我们所知的标准模型也变成了不可能的事。

超对称假设可能有助于消灭麻烦的辐射修正，但它看起来已经不再是等级问题的“自然”解答，而且它在事实上也没能产生任何可以检验的预言。

认为超对称假设最重要的思想就是为粒子找到了对应的超粒子，这样的想法是有误导性的。确实，超粒子是超对称不可避免会产生的结果，但超对称假设中最重要的思想其实是假设费米子与玻色子之间具有本质的时空对称性。实际上，超对称与其说是一种理论，不如说是一整类理论所具有的属性——存在各种各样不同的超对称理论。

这一思路又带来了一条线索。如果我们假设广义相对论的时空是超对称的，那我们就有了一个超引力理论。1976年，美国物理学家丹尼尔·弗里德曼（Daniel Freedman）、荷兰物理学家彼得·范尼乌文赫伊曾（Peter van Nieuwenhuizen）和意大利物理学家塞尔焦·费拉拉（Sergio Ferrara）提出了超引力理论的早期版本，斯坦利·德塞尔与布鲁诺·祖米诺也与之独立地提出了一个版本。这些理论物理学家发现，采用超对称假设，可以部分解决（虽然不能完全解决）引力的量子场论中重正化的问题。看起来，与引力子相关的辐射修正中令费曼及其他物理学家困扰的无穷大的贡献，通过引入引力子的超对称伙伴——引力微子（gravitino）可以被抵消一部分。

围绕8种不同的超对称性建立起来的扩展后的超引力理论，让物理学家兴奋了起来。这一理论不仅包含引力子，还包含8种引力微子和154种其他粒子（从表面看，这似乎暗示夸克和胶子可能并不是基本粒子）。在一段短暂的时间内，物理学家相信这个超引力理论是真正的终极理论。1980年，史蒂芬·霍金就职剑桥大学卢卡斯讲席教授（牛顿也曾担任过这个职位），他在就职演讲中提出，也许理论物理学的尽头已依稀可见。当时围绕着超引力理论仍有争论，但霍金认为这是“目前所

见的唯一候选理论”[注]。

然而，尽管超对称带来了诱人的前景，它也不能完全解决重正化问题。基于8种超对称性的超引力理论是否可重正化在今天仍有疑问，而早在20世纪80年代初，超引力理论就因难以解决这个问题而逐渐淡出了人们的视线。[注]

随后，1982年，一位在马里兰大学理论物理中心工作的年轻的理论物理学家，阿米塔巴·森（Amitabha Sen）发表了两篇论文，马上引起了部分理论物理学家的注意。[注]

为了理解森到底做了什么工作，我们要先另起一个话题。

在大部分物理学领域中，矢量都扮演了极为重要的角色。矢量指既包含一定的大小（小、中、大），也包含一定的方向（指向这里或那里）的物理量。物理学中最简单的矢量的例子或许就是动量[注]了。在经典力学中，物体的动量就是物体的质量乘它的速度，它的方向也显然就是物体移动的方向（从这里到那里）。我们通常会将这样的矢量画成一个箭头，箭头的方向就是矢量的方向，箭头的长度则是矢量的大小：箭头越长，矢量的大小越大。

大小和方向都是决定一个矢量的关键因素——问一问专业网球选手他们是怎么准备发球的，你就知道了。

在量子力学中，矢量扮演的角色更为重要，甚至是根本性的。我在第4章提到过电子的自旋：电子在磁场中可以有两种（且只能有两种）取向，我们称之为自旋向上和自旋向下。这一性质可以追溯到电子的内禀角动量。我们用矢量来表示自旋，这样的矢量可以指向两个不同的方向，大小为$h/4\pi$，其中h为普朗克常数。

尽管矢量比只包含大小不包含方向的标量稍微复杂一些，但在平直

的欧几里得空间中，分析移动的矢量的力学性质并不会带来太大问题。一个带有特定大小和方向（假设它向上）的矢量在受到某种物理力作用时，会从一个坐标为（x_1,y_1,z_1）的位置移动到坐标为（x_2,y_2,z_2）的位置，而其大小和方向都不改变，这没有任何问题。但如果我们考虑空间弯曲的情况，就会遇到麻烦了。

为什么呢？我们不妨了解一下中国人在3世纪发明的器具：指南车。这是一种两轮战车，车上有一个木雕人像，举着一根武器，指向一个方向。在指南车出发之前，人们手动设置指南车，让它指向南方。这样一来，某种内部的齿轮装置就会保证指南车每次拐弯转向以后，人像手中的武器仍然指向南方（这种指南车的发明远远早于磁铁指南针）。

我们将人像看作一个矢量，从北极点出发，在这里任何方向都是南方（见图15）。我们让人像指向一个方向，然后一直走到赤道（先不用担心到底如何做到这一点了），就相当于让指南车走过了地球表面的一条“直线”——如我们所知，这其实是一条测地线。到了赤道之后，我们让指南车转朝东，但指南车的内部装置保证了人像一直指向南方。我们让指南车向东走大概10000千米，即地球周长的1/4，然后再将指南车转朝北，一路回到北极，在整个过程中，指南车上的人像仍然一直指向南方。

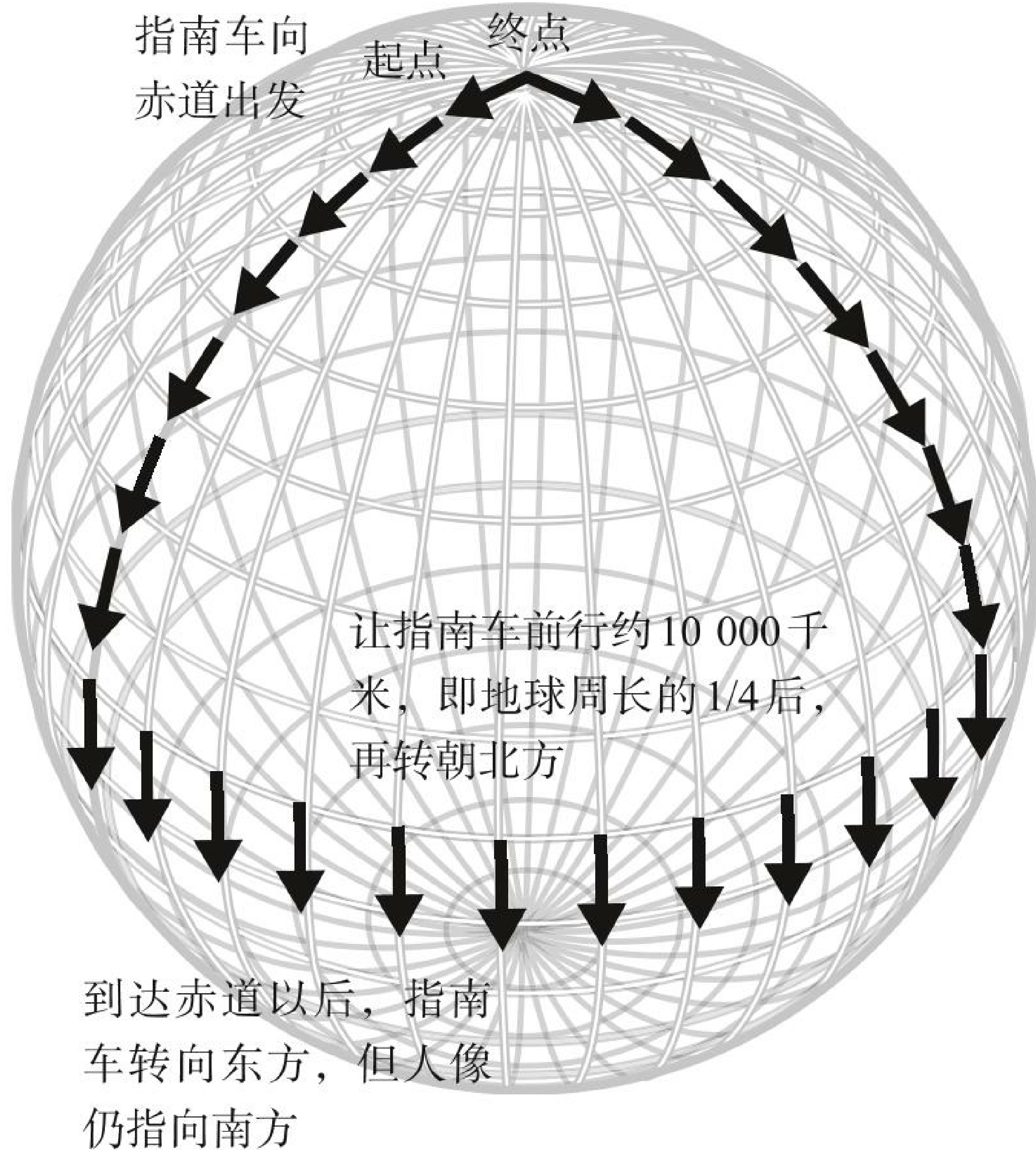


图15 一辆指南车（如图中上方所示）从北极点出发，向赤道（下方）行进。到达赤道后，指南针转朝东，前行约10000千米后再转朝北。当指南车回到北极点时，我们发现上面的人像所指的方向相对于出发时偏离了90度，这就是矢量的平行移动

我们让指南车回到了起点，但指南车上的人像的指向却与初始方向成90度夹角。我们没有通过任何物理过程改变矢量的取向，仅仅是让它在球面上“平行移动”就改变了它的方向。

既然矢量所指的方向在任何物理学理论中都是非常关键的特性，那么，一个容许各种弯曲空间存在的理论（如广义相对论），就需要考虑到这类平行移动效应。不仅如此，这类理论还应该让平行移动效应与坐标系的选择无关，这是广义协变性的要求。爱因斯坦完全清楚地意识到了这件事。

意大利数学家图利奥·列维–奇维塔（Tullio Levi-Civita）提出了一个解决方案，它依赖于空间自身的弯曲。[注]在我们的指南车例子里，我们不是想象指南车在地球表面上移动，而是想象我们旋转了整个地球，以让指南车沿着同样的测地线轨迹运动。这一解决平行移动问题的方法叫作球面上的列维–奇维塔联络：我们不再尝试用可能会很复杂的坐标系统（x,y,z）来描述矢量在地球表面的移动，而是让几何（尤其是对称性）自己来做这件事。这种联络就为矢量在球面上的移动提供了一种自然的方法，无须求助于不自然的坐标系。

球面联络的方法也许看起来很难懂，但实际上形成粒子物理标准模型的量子场论也可以被看作是“联络理论”。[注]在量子场论中，量子场进行了矢量（如自旋的电子）的平行移动，而如果量子场是“弯曲”的，即它的大小和方向在各个位置不同，那么将一个矢量沿一条闭合的路径移动一圈，它在回到起点时的方向可能就和起始状态不一样了，正如指南车在回到北极点时人像指向的方向与一开始不同那样。只要我们把量子场“用钉子固定到”一个任意的平直欧几里得背景空间中，以描述矢量从“这里”到了“那里”、又回到“这里”，这样的事情就会发生。

这就是问题所在。如果广义相对论可以被重新表述成一种联络理论，也许它就能与经典场论一样被量子化了，正如麦克斯韦的经典电磁

场理论被量子化而产生量子电动力学一样。然而，还有一个很大的不同点：在广义相对论的联络理论表述中，引力场是联络系统，不过我们当然没有必要把这个场再钉到一个任意的背景时空里去了。时空度规会从联络系统中自然而然地产生。

科学家很早就意识到了这一点。20世纪40年代末，爱因斯坦（还有其他独立研究该问题的科学家，如薛定谔）就尝试用一种列维–奇维塔联络系统作为主要变量来重新表述广义相对论，以将其与电磁理论统一起来。但这一过程很艰难，爱因斯坦也充满疑虑。有一次他向薛定谔评论道："我们已经在这件事上浪费了很多时间了，得到的结果却像魔鬼祖母带来的礼物一样。"[注]这些重新表述广义相对论的早期尝试在数学方面陷入了困境，未能得到任何结果。

如今，以联络系统重新表述的广义相对论看起来好像抽象程度更上一层楼了，这并不是令人惊讶的事。如果其思想是要构造一个关于时空本身起源的理论，那么（我们只能接受）它几乎不可能是符合直觉、容易理解或容易视觉化的。这没办法，对不起了。

到20世纪70年代末，有科学家将类似逻辑应用于携带自旋角动量的物体的移动，提出了一种自旋联络系统，在固体物理领域有所应用。自旋联络的概念并不是新产生的——它的起源可以追溯到20世纪30年代，但阿米塔巴·森发现，它可以用来重新表述广义相对论的ADM哈密顿形式，用自旋联络来代替时空度规，这样可以导出我们更熟悉的弯曲时空。这一思路看起来很有前景：它暗示某种物体可能具有我们所期望的引力子拥有的性质。

但这个思路还只是一个停留于草稿纸上的、涂涂抹抹的想法而已。森与很多理论物理学家进行了有益的讨论，包括查尔斯·米斯纳，他还得到了在印度出生的理论物理学家阿贝·阿什特卡的"建议与鼓励"[注]。森在芝加哥大学读博士时，阿什特卡在那里做博士后，他们合作撰写了

几篇研究论文。阿什特卡当时正成为那一代广义相对论研究者中的领军人物。[注]他们成了亲密的朋友，经常长时间一起散步，森后来甚至还是阿什特卡1986年的婚礼上的伴郎。至今，他们仍然是亲密的朋友。

阿什特卡意识到，森的想法有望完全发展出广义相对论的哈密顿形式。后来森离开了物理学界，转行进入了电信行业，最终进入摩托罗拉公司工作。在那之后的两年里，阿什特卡极大地扩展了森的想法，推进计算结果并得到了惊人的发现。引入自旋联络不仅大大简化了方程，还让方程的形式更接近经典的场论，或许离完整的量子场论只差一步。

这不仅仅是相似的问题了：这一理论如今"有可能将量子场论中某种无疑十分有力的数学技巧引入引力理论中"。[注]它消除了广义相对论与基本粒子理论之间的鸿沟，又保留了广义相对论内在的对几何的强调。

1979年，李·斯莫林在哈佛大学完成了博士阶段的学习，在之后的几年里他又去了普林斯顿高等研究院、圣巴巴拉理论物理研究所和芝加哥大学做博士后研究员。正如悉尼·科尔曼所警告的那样，斯莫林没有获得任何确定的进展，甚至对于自己还能找到科研工作感到相当困惑。"一个原因肯定是，当时只有很少的一部分人在做量子引力理论研究，"他说，"因此竞争压力很小。"[注]至少他的同事们看起来对他的工作还是有兴趣的。

1984年7月，斯莫林被任命为耶鲁大学助理教授。几年前，森的论文刚发表时，斯莫林就读过他的论文，他尝试在森的论文基础上做一些工作，但没有立即取得成效。他从1980年开始就认识阿什特卡了，也一直与他保持着联系。1985年，斯莫林在一通电话中听说了阿什特卡关于自旋联络的研究，他意识到，这就是将量子引力变为一门真正的学科所需要的东西。"利用这个理论，我们马上就有可能计算出关于普朗克尺度上的时空结构的清晰预言。"[注]

于是，他邀请阿什特卡来耶鲁大学做一场报告。

---

1. Kenneth R.Miller,quoted by Carl Zimmer,New York Times,8 April 2016,available at https://www.nytimes.com/2016/04/09/science/in-science-its-never-just-a-theory.html?_r=2
2. 有人认为这个对称性破缺的过程是暴胀子场引发的，正是这个过程引起了宇宙的暴胀。
3. Howard Georgi,interview with Robert Crease and Charles Mann,29 January 1985.Quoted in Robert P.Crease and Charles C.Mann,The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics,Rutgers University Press,New Brunswick,NJ,1986,p.400.
4. 意大利物理学家卡洛·鲁比亚（Carlo Rubbia）解释道："这个实验就是把五六个研究生送到地底下几英里处，看着一大池子水长达五年。"（引自Peter Woit,Not Even Wrong,Vintage,London,2007,p.104 ）
5. Sheldon L.Glashow,with Ben Bova,Interactions: A Journey through the Mind of a Particle Physicist and the Matter of This World,Warner Books,New York,1988,p.309.
6. 着衣质量指考虑了粒子与自身的相互作用以后得出的粒子质量，即粒子和周围一团虚粒子的质量总和，区别于上文中提到的裸质量。——译者注
7. Stephen P.Martin,'A Supersymmetry Primer',version 6,arXiv:hepph/9709356,September 2011,p.5.
8. 真实的历史比这要稍微更复杂一些（这是典型现象），好几个理论物理学家先后发现和重新发现了超对称理论的基本原理。
9. "wino "的发音大致是"威诺"。
10. 还有一个问题在于，如果超对称的确存在，那么所有的物质粒子都将是不稳定的。
11. 2017年3月，欧洲核子研究组织的大型强子对撞机ATLAS实验组发布的最新结果表明，如果超对称确实存在，假想中胶子的超对称伙伴胶微子（gluino）的质量必须超过质子质量的2000 倍。
12. S.W.Hawking,'Is the End in Sight for Theoretical Physics?',Physics Bulletin,32 (1981),17.This is an abbreviated version of Hawking's inaugural lecture,delivered on 29 April 1980.
13. 计算辐射修正需要处理"圈"的问题，其复杂程度各异。科学家证明，超引力在只含有一到两个圈的简单修正情况下可重正化，但对于更高阶的圈就不行了。
14. 森在芝加哥大学读研究生的时候已经分别在1981年和1982 年各发表了一篇论文。
15. 动量也称线动量。——编者注
16. 列维·奇维塔是意大利数学家格雷戈里奥·里奇–库尔巴斯特罗（Gregorio Ricci-

Curbastro）的学生，里奇·库尔巴斯特罗是张量积分的发明者，爱因斯坦正是利用张量积分表述了广义相对论。1915—1917年，列维·奇维塔曾与爱因斯坦通信，讨论与广义相对论的数学结构有关的问题。他为爱因斯坦的《狭义与广义相对论浅说》的意大利语译本撰写了序言，该译本于1921 年首次出版。

17. 其实，1918年德国数学物理学家赫尔曼·外尔（Hermann Weyl）就在寻找一种联络理论，他在寻找的过程中发现了后来被称为“规范理论”（gauge theory ）的基础。这是一种特殊类型的场论，广义来讲，它奠定了所有现代量子场论的基础。

18. Albert Einstein,letter to Erwin Schrödinger,20 May 1946,quoted in Walter Moore,Schrödinger: Life and Thought,Cambridge University Press,Cambridge,UK,1989,p.426.

19. Amitabha Sen,‘Gravity as a Spin System’,Physics Letters B,119 (1982),91.

20. 阿什特卡就任美国国家科学院成员时，该机构对他表彰的致辞是：“阿什特卡对广义相对论做出了重大贡献，统一广义相对论与量子物理学，发展出了圈量子引力理论。”

21. Abhay Ashtekar,Ashtekar Variables,available at http://www.scholarpedia.org/article/Ashtekar_variables.

22. Lee Smolin,Three Roads to Quantum Gravity: A New Understanding of Space,Time and the Universe,Phoenix,London,2001,p.122.

23. Ibid.,pp.125–6.

第8章 猜出精确的解

阿贝·阿什特卡取得了重要的进展，但他的工作的影响力只局限在一个很小的理论物理学家组成的圈子里面。原因很简单：1984年底，首次超弦革命已经开始了。

弦论已经有很长一段历史了。它的基础可以追溯到1968年的夏天，一位在CERN工作的年轻意大利博士后、物理学家加布里埃莱·韦内齐亚诺（Gabriele Veneziano）正困惑于如何描述π介子（我们如今知道它包含一个夸克和一个反夸克）这类粒子的碰撞和散射。一位叶史瓦大学的年轻教授伦纳德·萨斯坎德（Leonard Susskind）听说了韦内齐亚诺的工作，他意识到韦内齐亚诺的描述完全等价于“两个小小的弦组成的圈互相靠近并交缠，振荡几下然后互相远离的过程”。注

根据萨斯坎德的原始描述，“弦”被定义为由色力组成的“线”，就像橡皮圈一样，把粒子紧拴在一起。大约同时，哥本哈根的尼尔斯·玻尔研究所的丹麦物理学家霍尔格·尼尔森（Holger Nielsen）、芝加哥的出生于日本的美国物理学家南部阳一郎和日本大学的后藤铁男也独立提出了类似的想法。物理学家顺理成章地开始想：如果不把基本粒子看成点粒子，而是把将粒子拴在一起的“橡皮圈”看成宇宙的基本结构呢？

这又是一个伟大的想法，与前文提到的超对称完全不同，它一下子解决了把基本粒子当成质量都集中于中心无穷小一点上的点粒子所带来的所有数学问题。在弦论中，不同的粒子由同一种弦的不同振动模式来表示，每个粒子的质量也就是它的弦振动的能量，用$m=E/c^2$来计算。

但早期的弦论看起来毫无前景，因此也没有吸引太多人的注意。它只能处理描述玻色子的弦，而且需要多达26个时空维度：25维空间和一

维时间。这个理论还预言了快子（tachyon）的存在，这是一种假想中的粒子，其质量为虚数，且只能以超过光速的速度运动，给维持时间秩序的因果律带来了混乱。

如果一个理论只能描述玻色子，它看起来就会很受限制，但现在理论物理学家已经找到了从“后门”把费米子引进来的办法。这个办法听起来不算新奇，那就是假设费米子与玻色子之间具有一种基本的时空对称性。与此同时，超对称理论也刚刚诞生，有些理论物理学家一直认为超对称理论其实是从早期的弦论中导出的。

超对称理论到底是如何诞生的，其实并没有那么重要。将弦论这一伟大的想法同超对称这另一个伟大的想法结合起来以后，到了1972年，早期弦论中更多根本性的问题都得到了解决，这很大程度上归功于在芝加哥的美国国家加速器实验室工作的法国理论物理学家皮埃尔·拉蒙（Pierre Ramond），以及普林斯顿大学的美国物理学家约翰·施瓦茨（John Schwarz）和法国物理学家安德烈·内沃（André Neveu）。

施瓦茨发现，超弦振动所需要的时空维度不再是早期弦论版本中的26个了，只需要10个——9个空间维度和一个时间维度，而快子也消失了。

此时的弦论还存在很多其他问题，学界仍然对其评价一般。科学界对一项科学贡献表示认可的方式之一，是让做出这项贡献的人轻易地在有声望的大学找到工作或终身教职，但对于此时的弦论来说，情况并不太妙。拉蒙被耶鲁大学拒绝晋升为终身教授。而施瓦茨的工作也不足以让他获得普林斯顿大学的终身教职，他转而去了位于帕萨迪纳的加州理工学院，接受了一份助理研究员的工作，与另一位法国理论物理学家若埃尔·舍克（Joël Scherk）一起继续钻研超弦理论。

施瓦茨后来解释道，他们之所以坚持钻研这个理论，是因为他们被它在数学上的美震慑住了，他们相信这么美的理论一定在某些方面是有

益的。不过还存在另外一个问题：

因此，我们在弦论上曾经遇到过的问题之一是，在它给出的所有粒子里，有一种粒子没有质量，却有两个单位的自旋。这是在描述强核力时我们曾经认为出了错的地方，因为没有哪种已知的粒子具有这样的性质。然而，这恰好就是我们期待量子引力所拥有的性质。[注]

超弦有两种形式，一种是开放的，一种是闭合的。开放的弦（称为开弦）两端松松地悬吊着，我们可以认为它们表示带电粒子及其反粒子，在顶头，弦的振动表示粒子携带着相互之间的力。[注]因此，开放的弦不仅预言了物质粒子，也预言了它们之间的力。但弦论也要求存在闭合的弦（称为闭弦）。当一个粒子和它的反粒子互相湮灭时，两个粒子的两端就各自相连，形成一个闭弦。

但如果存在闭弦，就意味着存在没有静止质量且有两个单位自旋的粒子，而这恰好就是我们所预言的引力子的性质。引力子在截至目前的所有粒子物理模型中还都没有位置，而理论对引力子的预言看起来也是颇成问题的。1974年，施瓦茨和舍克把弦论的这个问题变成了一个优点。他们提出，超弦理论将大自然的所有力都看作开弦和闭弦的不同振动模式。在超弦理论中，所有这些力看起来都已经自动统一了起来。它不仅有望成为关于强色力的理论，还有望成为万物理论。

看起来，当时已知的所有基本粒子（它们的质量、电荷、自旋），以及它们之间的相互作用力，还有所有无法从粒子物理标准模型中以第一性原理导出的参数，都可以被归入一个只包含两个基本常数的理论中。这两个基本常数中，一个决定了弦的张力，另一个决定了弦之间耦合的强度。

当然，这种弦自身的本质需要被重新诠释。引入引力物理学中的某些部分，意味着弦如今不能再被诠释成夸克与反夸克之间的尺度大约为1飞米（10^{-15}米）的橡皮圈，它们的尺度必须更小，与普朗克尺度相一

致——这比飞米还要小20个数量级。

而关于弦论，还有一些顽固的问题一直存在，虽然没有人感兴趣，但它们的确存在。

施瓦茨在位于日内瓦的CERN工作了几个月，在此期间开始同伦敦玛丽女王大学的英国物理学家迈克尔·格林（Michael Green）合作。他们一起探索了三种不同的超弦理论（分别称为I型、IIA型和IIB型）的各方面。这三种理论都需要10个时空维度，但在应用超对称的方式时各不相同。与最小超对称标准模型一样，I型超弦理论只利用了一种超对称，而II型超弦理论则利用了两种。

尽管施瓦茨和格林的工作一直被物理学界所忽视，但超弦理论逐渐引起了物理学家的注意，并赢得了一些拥护者。其中之一就是普林斯顿大学的数学物理学家爱德华·威滕（Edward Witten）。

20世纪80年代初，威滕刚刚30岁，还是位相对年轻的理论物理学家，但已经是一位现象级人物。他的职业生涯堪称文理兼修：他先是在波士顿附近的布兰代斯大学学习历史学和语言学，然后在威斯康星大学研究经济学，又从事了一段时间的政治工作。

他参与了乔治·麦戈文（George McGovern）1972年的总统竞选活动，在麦戈文被理查德·尼克松压倒性地击败后，威滕抛弃了政治，转而前往普林斯顿研究数学。没过多久，他就转向了物理学的研究。在QCD的创立者之一戴维·格罗斯的指导下，威滕于1976年获得博士学位。仅仅4年之后，他就成为普林斯顿大学的终身教授。

威滕渐渐出名，被认为是一位真正的天才，是当代的爱因斯坦。1982年，他获得了麦克阿瑟基金会颁发的“天才奖”。

威滕对超弦理论感兴趣并参与其中，这个事本身就能吸引人们更关

注超弦理论了。他马上说服施瓦茨和格林，告诉他们：如果想要让这一理论成为粒子物理标准模型的可行的替代理论，让它真的有成为万物理论的潜力，他们就需要解决关于该理论的一些问题。在当时的超弦理论中，哪怕应用最简单的“单圈”的辐射修正都会破坏理论的数学一致性，因此有些问题必须理清。

1984年夏天，施瓦茨和格林找到了解决这一问题的方法。研究进展得很快，他们在9月发表了一篇论文详细介绍他们的方法，而同一个月晚些时候威滕也向同一期刊提交了自己关于超弦的第一篇论文。在普林斯顿，戴维·格罗斯、杰弗里·哈维（Jeffrey Harvey）、埃米尔·马丁内茨（Emil Martinec）和瑞安·罗姆（Ryan Rohm）——这四个人被合称为“普林斯顿弦论四重奏”——又发现了一种新类型的超弦理论，被称为杂化超弦理论（heterotic superstring theory）[注]。事实证明有两种类型的杂化超弦理论，它们都需要10个时空维度，这就让弦论的种类总数达到5种。他们于1984年11月提交了论文以供发表。

第一场超弦革命就此拉开了序幕。[注]

20世纪80年代初，李·斯莫林被超弦理论所吸引，渴望了解更多关于它的知识。但他意识到，如果它想要真正成为一种量子引力理论（而非仅仅声称是量子引力理论，更别提成为万物理论了），那么弦论研究者就必须对理论关于背景时空的假设采取某种措施。把基于点粒子的描述改成基于弦的描述确实消除了一些数学上的不一致性，引入超对称则缩减了理论所需的维度数目，并消除了麻烦的快子（虽然产生了新的代价，如引入了更多的参数，以及超对称性破缺的问题），但在超弦理论中，超弦仍然在九维的空间和一维的时间中运动，空间与时间维度仍是分开的。

斯莫林费了一番苦功夫才明白背景时空的重要性，他尝试了多种方法，但都失败了，有时候失败得很惨痛。在他读博士和做博士后研究员

的时期，他受到了一系列粒子物理学领军人物的影响，如美国物理学家肯尼思·威尔逊（Kenneth Wilson），以及苏联物理学家亚历山大·波利亚科夫（Alexander Polyakov），以及一位不那么出名的英国独立理论物理学家——朱利安·巴伯（Julian Barbour）。事后证明，这些早期的交集对斯莫林产生了极大的影响，几乎塑造了他的整个职业生涯。

从威尔逊和波利亚科夫那里，斯莫林学到了将连续时空缩减到由固定的点和距离组成的有规律的格点的方法。这一方法在QCD的计算中是必不可少的。

尽管QCD方程的呈现方式相对直观，但它们无法得出解析解，即无法"在纸上"被演算出来。色力极强，因此与色力相互作用所对应的能量也很高。而将夸克束缚在一起的胶子也带色荷（红、绿、蓝），就相当于一切物体都与所有其他物体发生相互作用。在这种情况下，什么事都可能发生，要想追踪QCD中所有可能出现的虚粒子及基本粒子扰动是极为困难的。

不仅如此，在QED中以费曼图为基础，在处理较小的辐射修正（即"扰动"）方面取得了很大成功的重正化方法，在QCD中完全不适用。它可以应用于色力耦合较小的短程相互作用（之前提过，色力的特性与电磁力相反，距离越短，作用越小），但在大多数情况下，理论物理学家只能借助计算机来解方程。

而在格点QCD中，表示夸克的量子场只由三维空间的点阵中特定位置的点决定，而不再像连续场那样是连续的。因此，胶子场的大小可以由点阵中临近的点之间的关联来决定。

因此，我们可以想象夸克只存在于格点上，而代表着胶子的"力线"就是邻近格点之间的连线。如果这一方法有效，你就可以把这种力线当成一小块条形磁铁周围的磁场（见第1章的图1）来处理。当然，把这些线想象成"弦"并不需要很大的想象力。

为了方便计算，格点之间的距离大概为1飞米的十分之一或百分之一量级，而格点之间的距离越短，就越接近连续体。为了减少计算机需要计算的数量，理论物理学家不断在越来越小的距离上做计算，并把结果外推至距离为零的情况。这一技巧一直沿用至今天。如今，计算已经达到了极为精确的程度，但对计算能力也有很高的要求：最严格的格点QCD计算需要用到世界上最大的超级计算机。注

在格点QCD中，格点只是一种让计算得以进行的数学手段。但如果我们认真探讨其含义，它相当于将我们的空间“量子化”成为一系列离散的点和距离组成的点阵。点之间的距离并不一定要被外推至零，有可能存在一个极小但仍然有限的距离，标志着一个无法被缩短的极限，也许其数量级与普朗克长度一致。

威尔逊和波利亚科夫（各自独立地）提出，我们也许能重新表述QCD，以点之间的“线”本身的特性和行为为中心，让QCD能得出解析解。这种线后来被称为“威尔逊线”或“威尔逊圈”，本质上是色力的量子化线或圈。

在量子场论中，我们一般认为场是第一位的。力线，即表示常数场强度的线，只是用来“绘制”场的“地图”的方法，就像二维地理地图中的等高线一样。我们意识到，在铁屑实验中，铁屑形成的看似离散的线其实只是幻影——磁场是连续的，这些线之所以会形成只是因为铁屑的大小有限。但量子化的力线在物理学中确实存在，如超导体的磁性。威尔逊和波利亚科夫提出，我们可以让这种线成为第一位的，让场从线中导出，而这恰恰就是弦论所做的事情。

力线的另一个特征是它们可以“流动”。磁场线从北极向南极，电场线从正电荷到负电荷，色场线从一种夸克色到另一种色。而如果不存在磁极，不存在电荷，不存在夸克，也就是说，如果我们移除所有物质，那么我们可以想象，这些场线并不会就此消失，而是会形成闭合的圈，

就像弦论中的闭弦一样。因此，这一观点也产生了力线与力圈的概念。

波利亚科夫更进了一步，他尝试完全用线与圈的形式来表示QCD，不求诸背景格点的帮助。

斯莫林在博士后时期发表的第一篇论文，就是将这些思想应用到引力上，但他只能到此为止了。固定的格点背景，正是广义相对论成功消灭了的背景时空，也就是说，广义相对论与格点思想完全不相容。“我从这次的失败尝试中得到的一个关键教训，就是所有涉及物体在一个固定背景中移动的理论都不可能成为成功的量子引力理论。”[注]他需要一个动态点阵，能更直接地参与物理过程，就像广义相对论中的时空本身一样。他从巴伯那里学到，他寻找的理论只能被理解成一种动态演化的关系网络，我们所熟悉的时空正是从中演生而来的。

当施瓦茨和舍克提出包含引力子的超弦理论有可能成为一种量子理论时，斯莫林决心找到一种与背景无关的理论，并令通常的时空能够以某种极限或近似的方式从中演生出来。他在芝加哥大学当博士后研究员的时候，努力尝试使用从威尔逊和波利亚科夫那里学到的方法，并得到了研究生路易斯·克兰（Louis Crane）的帮助。

克兰不是一名普通的研究生。他是个数学天才，早在十几岁的时候就被芝加哥大学录取，但后来又因为在政治方面太激进而被开除。10年后，克兰又回到了这所大学。

他们俩一起尝试了两种不同的方法，并用其中一种方法发表了两篇论文。这部分工作让斯莫林确信，他所寻找的量子引力理论必须基于威尔逊线或威尔逊圈网络的演化，但他不知道如何实现之。

1985年12月，斯莫林邀请阿什特卡来耶鲁大学做了一场报告，讲他对自旋联络的重新表述。斯莫林很快意识到，报告的内容正是他长期以来一直在寻找的东西。他在开车送阿什特卡去哈特福德的机场返程的路

上出了点儿小意外注，一回到办公室，斯莫林就开始着手把新方法应用于他和卡兰在芝加哥建立起来的结构。

那时，他已经安排好了6个月的时间来参加一项名为“量子引力各方法协调”的研讨会，由阿什特卡、戴维·博尔韦尔（David Boulware）和特德·纽曼（Ted Newman）牵头，在圣巴巴拉的理论物理研究所注举办，从1986年1月开始。他招募了两位朋友来支持他，一位是研究生保罗·伦特恩（Paul Renteln，阿什特卡在耶鲁做报告的时候，他也坐在下面专注地听讲），另一位是特德·雅各布森，他是加州大学圣巴巴拉分校的助理研究员。

斯莫林与伦特恩一起，将基于引力圈的方法用在了阿什特卡的自旋联络表述上，得到的理论只包含量子圈。也就是说，引力并不从一个极（或者电荷）“流”到另一个极（电荷）上，而是形成闭合的圈，就像弦论中的闭弦一样。乍一看，这好像违背了本书第2章的标题——“引力不是力”，但引力不是力的前提是时空本身即为引力场。而在斯莫林和伦特恩尝试的这种数学表述中，逻辑是反过来的：引力成了第一位的，而时空（即引力场）是在引力的基础上衍生出来的现象。

关于圈与格点是如何相互作用的，斯莫林和伦特恩得到的结构只需要遵循几条简单的规则。但是，正如波利亚科夫所说，要得到真正的进展，必须完全消除格点，只处理圈之间的关系。

1986年2月的某一天，斯莫林和雅各布森一同站在研究所一间小会议室的黑板前。他们已经一起重构了方程，令方程只包含圈及它们产生的引力场，不包含格点。受到这一进展的鼓舞，他们猜出了这组方程的一个解析解。就像薛定谔的波函数描述了氢原子中电子的量子态一样，这组方程的解也描述了量子化的引力圈，即时空几何形状的量子态。

他们的结果让人大吃一惊。十多年来的挫败已经让理论物理学家学会谨慎，做好最坏的准备。因此，斯莫林和雅各布森只期望能找到近似

解。然而，他们只猜了两三次就找出了方程的精确解。斯莫林后来回忆道：

> 我仍然清楚地记得那块黑板，当时天气晴朗，特德穿了一件T恤（不过圣巴巴拉总是天气晴朗，而特德总是穿T恤）。注

几天之内，他们就发现，只要他们使用某些规则来控制圈之间交叉的方式，这样的精确解可以有无数个。

斯莫林等人花了一段时间才发现这一系列解只是形式上的解，也就是不具有物理意义（它们对应的体积为零），在这方面还有很多工作要做。但情况表明，转向自旋联络的形式体系带来了一条重要的线索。它表明，这样一种理论有可能不需要背景时空框架就能存在。这一理论所描述的并不是存在于空间之中的圈，而是圈定义了空间。这已经是在正确的方向上前进了一大步。

在这里，有必要暂停下来，回头思考一下。阿什特卡推导出了一个很像经典场论的广义相对论版本，而斯莫林、伦特恩、雅各布森则利用威尔逊圈的帮助将这一理论进行了量子化。虽然还有很多问题需要解答，但这些早期结果已经极为振奋人心了。它无须引入其他新概念（如会带来大量未知可调参数，还会带来超对称破缺问题的超对称概念），仅仅需要引入一些与自旋联络有关的新变量（后来被称为阿什特卡变量）。

在这一理论上要做的事情有很多，下一步则是证明该理论的解不会随着坐标系的变换而改变，即证明这些解确实与背景无关。斯莫林认为他们已经完成了这项困难的工作，证明解的背景不变性的过程应当是相当简单而直接的。

斯莫林与雅各布森在圣巴巴拉研讨会接近尾声时的一场会议上公布了他们的结果。听众席间有一位年轻的意大利理论物理学家，刚刚在帕

多瓦大学获得博士学位，他的名字是卡洛·罗韦利。

获得博士学位以后，在1986年初，罗韦利勉强从多个来源凑足了资金（其中包括他自己的积蓄）去国外访学。他的目标只有一个：他想见见“量子引力世界里最厉害的人物”[注]。

罗韦利的第一站是伦敦的帝国理工学院，他在那里拜访了克里斯·艾沙姆，正是艾沙姆写的综述文章让他开始关注困扰着这一领域的问题。罗韦利把自己困惑的想法一股脑地倒向艾沙姆，专注地聆听艾沙姆的见解。这个年轻人在附近的肯辛顿花园独自长久地踱步，仔细琢磨艾沙姆的话。他把能找到的论文都复印了一份，如饥似渴地阅读它们。罗韦利在伦敦待了两个月。

从艾沙姆那里，他了解到纽约锡拉丘兹大学一位名叫阿贝·阿什特卡的年轻的印度理论物理学家做出了很有前景的研究，但还没有发表。[注]他从阿什特卡手写的笔记上了解到关于新变量的想法（这些笔记已经在理论物理学家的小圈子里流传开来，罗韦利记得有些复印版本是印在紫色的纸上的），并迅速写信给阿什特卡，请求拜访。于是，他在锡拉丘兹又待了两个月，直接向广义相对论ADM哈密顿形式新表述的提出者学习了这一理论。

尽管罗韦利对于大洋彼岸的美国理论物理学界而言完全是无名小辈，但他还是自费参加了圣巴巴拉的研讨会。他没有受到邀请，只是坐在听众席里。他听了斯莫林和雅各布森的报告，他们在报告中解释了如何用一种基于威尔逊圈的方法得到阿什特卡表述的一些精确解。

罗韦利没有跟斯莫林讲上几句话，但他已经知道下一步要去哪里了。

与此同时，超弦理论正在经历一个注定无望的转折。

引入了弦和超对称两个伟大的思想以后，超弦理论解决了一些数学上的问题，但物理学家面对着5种不同的超弦理论——每种理论的有效性看起来都完全等同——又不知道该怎么做了。他们还必须解决所有种类的弦论都必须面临的6个“额外”空间维度该怎么处理的问题。在我们的经验中，空间绝对是三维的，因此弦论学家就得想办法把额外的6个空间维度卷曲起来，藏到我们的视线之外。

1984年，当时任职于普林斯顿高等研究院的美国理论物理学家安德鲁·施特罗明格（Andrew Strominger）与当时任职于得克萨斯大学的英国数学物理学家菲利普·坎德拉斯（Philip Candelas）合作，尝试寻找这一问题的解决办法。施特罗明格去图书馆搜索文献，看到了华裔美国数学家丘成桐新发表的一篇论文。这篇论文证明了卡拉比猜想（Calabi conjecture），这个猜想以意大利裔美国数学家欧金尼奥·卡拉比（Eugenio Calabi）的名字命名。该证明证实了一系列形状（如今被称为卡拉比–丘流形）的存在，而这些形状刚好是隐藏弦论的额外维度所需要的。图16所示就是一个卡拉比–丘流形的例子。

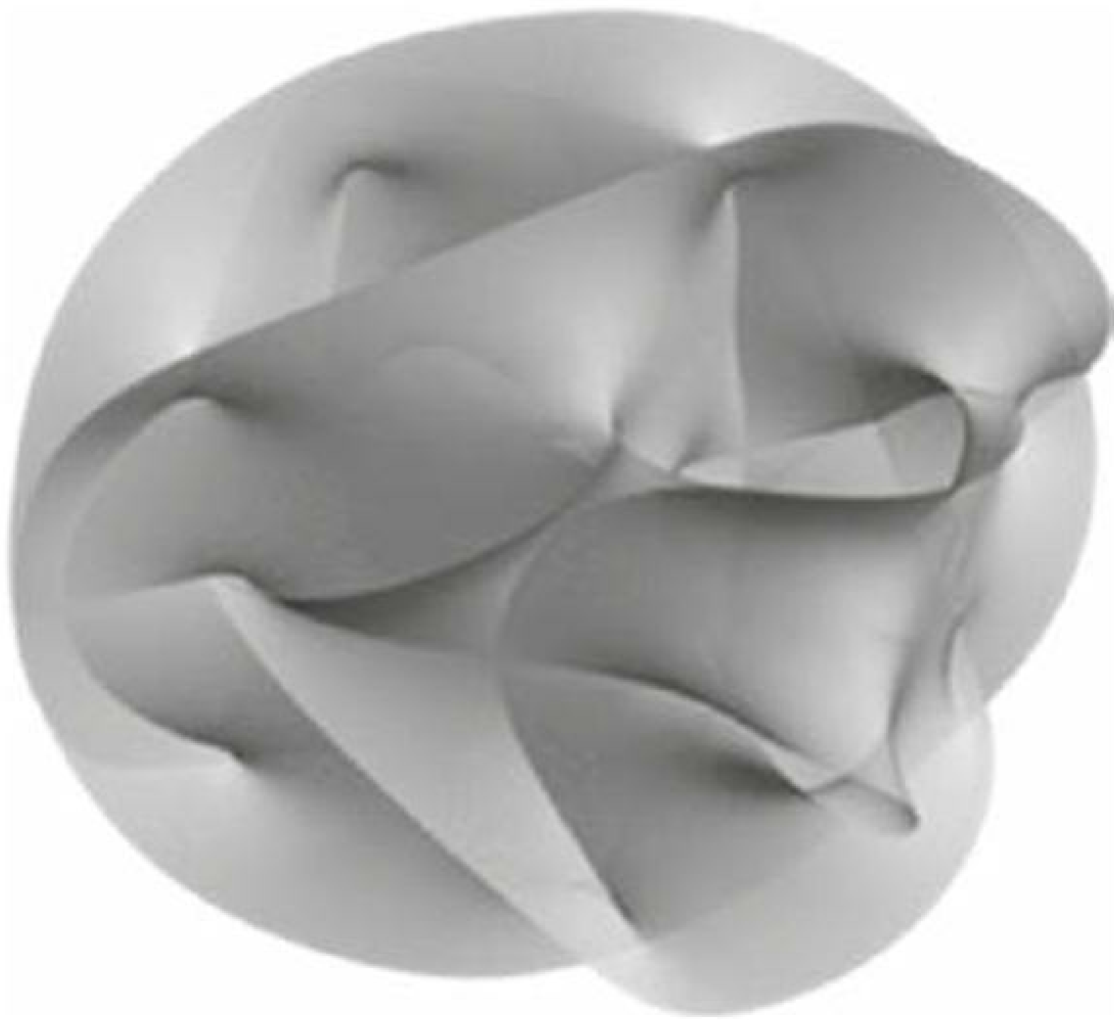


图16 卡拉比－丘流形是一种很复杂的高维代数表面，超弦理论可以用它来隐藏所需要的6个额外维度

施特罗明格和坎德拉斯与加州大学圣巴巴拉分校的加里·霍罗威茨（Gary Horowitz）取得了联系，加里曾以博士后副研究员的身份与丘成桐共事。施特罗明格还拜访了威滕，发现威滕已经独立地得到了同样的结果。

这四位理论物理学家合作撰写了一篇论文，并于1985年发表，这篇论文首次提出了“隐藏维度”的想法。如果我可以标记出面前桌子上键盘前的某个无穷小的点，并且让镜头聚焦于这个点，将其放大，以至于我

们能看到1厘米的$1/10^{33}$，那么根据超弦理论，我们就能感受到另外6个维度卷成了卡拉比–丘流形。

虽然理论要求这些额外维度必须隐藏起来，但这并不意味着这些额外维度不会在物理上产生影响。事实恰好相反，卡拉比–丘空间的准确形状以及它拥有的“洞”的数量，决定了可能存在的超弦振动的数量。因此，它也决定了物理学常数、物理学基本定律，以及普遍存在的粒子的能量范围（谱）。换句话说，卡拉比–丘空间的形状决定了我们处于哪一种物理宇宙中。这么看来，理论物理学家只要找出哪种特定的卡拉比–丘流形与标准模型描述的粒子相一致，以及与主宰着它们性质与行为的物理学定律相一致就行了。他们要找到一个与我们的宇宙相一致的卡拉比–丘空间。

然而，大自然并不总是如我们所愿，这是常事。在《隐藏的现实》（*The Hidden Reality*）中，布赖恩·格林（Brian Greene）写到了他在研究这些数学形状时的早期经历：

在20世纪80年代中期，当我开始研究弦论时，当时为人所知的卡拉比－丘流形总共也只有几种，因此每个人可以研究一种，寻找它所对应的物理学。我的博士论文课题就是这一方向的早期尝试。几年之后，当我跟随丘成桐做博士后工作的时候，卡拉比–丘流形的数目增长到了几千个，要穷尽分析就更难了——不过这种活儿给研究生干正合适。然而，随着时间推移，卡拉比–丘流形的目录开始大大增长……它们的数目现在比所有海滩上包含的沙子总数加起来还多。(注)

更不妙的是，假设在我们熟悉的三维空间的边缘确实存在着这样一种形状，我们似乎也没有任何办法识别出这种与我们宇宙相一致的独一无二的形状。在1986年9月发表的一篇文章中，施特罗明格承认：“所有的预测能力都失效了。”(注)

在这一方面，弦论面临一些反对的声音，尤其来自老一代的理论物

理学家。费曼在几年后出版的一本书批评弦论学家“没有做任何计算”，也“不检验自己的想法”。[注]格拉肖认为，弦论学家“甚至不能确定自己的数学形式中是否包含对于像质子和中子这样的粒子的描述”。[注]

有一部分弦论研究者失去了信心，并完全离开了这一领域。但仍有很多人坚守阵地，他们不相信弦论就此被宣判了死刑。而弦论的风潮已经刮起，很多人因为这方面的研究得到了职位（施瓦茨在1985年被加州理工学院聘为理论物理学教授）。从某种意义上来说，弦论危如累卵。

---

1. Leonard Susskind,The Landscape: A Talk with Leonard Susskind,Edge.org,April 2003.Available at https://www.edge.org/conversation/leonard_susskind-the-landscape.
2. 请注意，我在这里并没有区分“弦”和“超弦”，但可以认为这里提到的所有物体都是超对称的。
3. 杂化超弦理论是Ⅰ型超弦理论与玻色子超弦理论的混合。
4. 20世纪70年代末80年代初，每年发表的关于超弦理论论文大约有50篇。1984年这一年中，这个数字增长到100篇，而在1987年，全年有1 200 篇关于超弦理论的论文发表。
5. John Schwarz,interview with Sara Lippincott,21 and 26 July,2000,Oral History Project,California Institute of Technology Archives,2002,p.17.
6. Lattice QCD and combined QED calculations of the small mass difference between the proton and the neutron were reported in March 2015: Sz.Borsanyi et al.,‘Ab initio Calculation of the NeutronProton Mass Difference’,Science,347 (2015),1452–5,arXiv:heplat/1406.4088v2,7 April 2015.See also the commentary by Frank Wilczek,‘A Weighty Mass Difference’,Nature,520 (2015),303–4,and Jim Baggott,Mass: The Quest to Understand Matter from Greek Atoms to Quantum Fields,Oxford University Press,Oxford,2017.
7. Lee Smolin,Three Roads to Quantum Gravity: A New Understanding of Space,Time and the Universe,Phoenix,London,2001,p.119.
8. 在送阿什特卡去机场的路上，斯莫林的车两个轮胎都没气了，他只能让阿什特卡搭便车去机场，自己停在路边等待帮助。不过，阿什特卡最终还是赶上了飞机。
9. 该所在21世纪初改名为卡弗里理论物理学研究所，名字来自为该所捐赠750万美元的挪威裔美籍企业家弗雷德·卡弗里（Fred Kavli ）。
10. Ibid.,p.40.
11. Carlo Rovelli,What is Time? What is Space?,manuscript translated by J.C.van den

Berg,p.13.Published by de Renzo Editore,Rome,2006.

12. 阿什特卡于1985年12月向《物理评论快报》提交了他题为“经典与量子引力的新变量”的论文，但这篇论文直到1986年11月才发表。阿什特卡承认这完全是他自己的责任——审稿人只要求他做几处细微的改动，“但是，因为圣巴巴拉研讨会太激动人心了，产生了如此多的新结果，我直到6个月之后才返回论文修改稿！”（引自阿贝·阿什特卡2017年12月11 日的个人通信。）

13. Brian Greene,The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos,Allen Lane,London,2011,p.91.

14. Strominger had shown that the ‘compactification’ of the six extra spatial dimensions could be achieved with vastly more spaces than those classified as Calabi–Yau spaces: A.Strominger,‘Superstrings with Torsion’,Nuclear Physics B,274 (1986),253–84.

15. Richard Feynman,in P.C.W.Davies and Julian Brown,eds,Superstrings: A Theory of Everything?,Cambridge University Press,Cambridge,UK,1988,pp.194–5.

16. Sheldon L.Glashow,with Ben Bova,Interactions: A Journey through the Mind of a Particle Physicist and the Matter of This World,Warner Books,New York,1988,p.334.

第9章 我用光了维罗纳所有的钥匙环

1987年8月，李·斯莫林和特德·雅各布森向《核物理学B》（*Nuclear Physics B*）期刊提交了一篇论文，介绍他们取得的突破。当时，雅各布森已经在马萨诸塞州波士顿附近的布兰代斯大学谋得了一份博士后职位，与斯坦利·德塞尔共事。虽然他们取得了成功，但当时还是没有人知道将量子理论与广义相对论结合起来到底有没有可能做到。不过至少他们要走的下一步已经颇为明了了。[注]

时隔十年后首次重新通读这篇论文时，雅各布森的心情相当复杂："它让我回忆起来当时我们感受到了怎样的乐趣和兴奋，但我也能理解为什么在那场研讨会结束时，我认为这不是一条很有希望的道路。"[注]雅各布森后来将研究重心转向黑洞物理学领域，希望建立一种更加物理的、自下而上的方法来接近量子引力。

尽管斯莫林和雅各布森推导出的精确解后来被证明没有物理意义，斯莫林仍然相信他们首次窥见了时空形状的量子态，而这一步原本是他认为的难点所在。下一个任务是解一系列方程，来证明这些量子态与坐标系的选择无关，即它们是广义协变的。他原本认为这会是比较容易的工作。

然而开始不久后，斯莫林一开始的乐观情绪很快便烟消云散。他回到耶鲁，与如今已获得助理教授职位的克兰合作，然而他发现，他们要么能找到代表这组方程的解的量子态，要么能找到代表那组方程的解的量子态，但是无法找到能够同时符合两组方程的解。他们开始确信，他们正尝试做的这件事情是不可能成功的。

卡洛·罗韦利之所以选择在大学时学物理，部分原因是为了逃避兵

役。拿到博士学位后，要求他服兵役的指令终于噩兆般地来临，他拒绝了，做好了在监狱里待两年的准备，他认为那也比当一年兵要强。但他运气不错，只被拘留了几天。他回忆道："那段时间，意大利政府正往黎巴嫩运送军队，这是'二战'以后的头一回，大众并不支持政府这样做。他们不想让我这种人制造风波，于是决定放我走。"注刚被释放，他就回到了锡拉丘兹，跟着阿什特卡开展进一步的研究，还开始计划去耶鲁拜访李·斯莫林。

在锡拉丘兹，罗韦利得到了一个噩耗：交往了很久的意大利女友决定与他分手。罗韦利很爱她，尽管他们讨厌婚姻这种"老旧"的概念（他们觉得订婚这种说法简直像是来自上个世纪），但罗韦利一直认为他俩会是一生的伴侣。女朋友提出分手让他极为震惊。原本第二天就要启程去耶鲁的他顿时没了心情，他甚至差点儿就要取消这次行程。

经过一番深思熟虑，罗韦利还是觉得这趟行程不能推迟，因此，1987年10月的一天，罗韦利出现在了斯莫林的办公室里。他们的讨论进行得十分艰难。斯莫林说："我跟他解释，说我这儿现在没什么可做的，因为我们这项研究完全陷入了困境，停滞不前。"注他对罗韦利说，他完全欢迎罗韦利待在这儿，但因为他们正在进行的工作看起来是不可能完成的，或许罗韦利还是应该考虑回意大利。

这个消息太让人心碎了。罗韦利的感情遭遇了打击，正处于"最深的绝望中"注，而现在看来他的科学理想也要受挫了。罗韦利无法控制自己的情绪，眼泪夺眶而出。看到斯莫林因为自己突然哭泣而表现出困惑的神情，罗韦利赶紧道歉并解释了他的不幸遭遇。斯莫林表示非常同情，并坦陈自己最近也刚刚经历了一场类似的分手。

现场一片尴尬的沉默。

为了转换话题，让气氛再次轻松起来，斯莫林问罗韦利喜不喜欢帆船运动。罗韦利露出了微笑，他确实热爱帆船运动。他们当即离开了办

公室，往耶鲁大学的船库走去。他们选了一条小船，在那一天接下来的时间里一直在康涅狄格州海岸线东边一个小海湾里度过。他们忘记了所有的科学问题，畅谈自己的生活、理想及感情问题。

罗韦利在克兰住的公寓里租了一个房间。在接下来的一天里，斯莫林完全没见到他的人影。但到了第三天，罗韦利来到斯莫林办公室门前。

“我找到解决所有问题的方法了。”他说。[注]

斯莫林、雅各布森和克兰全力发展的这一理论已经消除了格点结构，但他们得出的量子态仍然是自旋联络的函数。然而，自旋联络本身周围还带着引力场，而在广义相对论中，引力场就是时空本身。因此，哪怕这些量子态看起来已经与背景的时空格点无关了，它们也并没有真正地与背景时空相脱离。这就解释了为什么他们得到的解没能通过坐标系检验。

罗韦利意识到，在此基础上，利用他从艾沙姆那里学到的技巧，对解进行一次重新表述，就能只以力圈的形式来表示量子态了。同样的逻辑可以用在多个问题上，这即将成为一类由交叉的圈——“引力圈”组成的理论，这类圈不仅存在于空间中，它们的集合本身即为空间。

不到一天，他们就确定这是一个极好的想法。往这个想法里填充细节又花了几个月的时间：

> 最终，我们得到了波利亚科夫提到过的宏大愿景中的那种理论：在这样一个理论中，只存在纯粹的圈，这些圈用极为简单的、可得到精确解的方程描绘了真实世界的一方面。而且，有了这种理论，只依赖于圈与圈之间的相互关系——它们如何打结、如何相连、如何形成扭结，我们就能构建爱因斯坦引力理论的量子版本。[注]

他们决定动身去锡拉丘兹，向阿什特卡展示这一发现。在去机场的路上，开道奇牌达特车的斯莫林与后面一名开玛莎拉蒂的男子发生了点儿小摩擦，玛莎拉蒂车主嫌斯莫林开得太慢。美国汽车和意大利汽车开展了一场短暂的不平等较量，美国汽车毫不费力地胜出。斯莫林的道奇全身而退，而玛莎拉蒂近乎报废。

罗韦利发着高烧，但仍坚持报告了团队的结果。报告结束后，所有人陷入了长长的沉默，打破这一沉默的是阿什特卡，他说这是自己头一次见证有可能成为量子引力理论的方程组。

不久之后，他们就飞往伦敦，向艾沙姆展示了这一结果，然后参加了于1987年12月14至19日在印度果阿举行的关于引力和宇宙学的国际会议。罗韦利并没有收到这个大会的邀请，而且申请参加的截止时间也已经过了，但一种冲动让他决定碰碰运气，直接过去。他的大胆让他如愿以偿：他成功地订到了大会参与者住宿的酒店里最好的房间。阿什特卡回忆起他们返程中在机场等待办理登记手续时，罗韦利与一位美丽的年轻姑娘聊得火热。他们要搭乘同一趟印度航班的飞机，但姑娘坐在头等舱，而他的机票是经济舱。在登机口，罗韦利询问他是否有可能升舱，以便和这位姑娘继续聊天。“卡洛终究是卡洛，他成功了！”[注]然而，尽管罗韦利成功升到了头等舱，但他和这位姑娘的座位并没有挨在一起，所以他终究没能和姑娘继续亲密地聊天，而此后这位姑娘也一直没有再注意到他。[注]

他们在会议上的报告非常成功。“量子广义相对论的圈空间表述”获得了更多人的关注，这一理论后来被称为“圈量子引力”（LQG）[注]。

故事并没有到此结束，而是才刚刚开始。这一小群理论物理学家愿意为此付出数年的艰苦努力，将他们的科学事业献给完善圈量子理论的工作。建立一组可以得出精确解的方程是一回事，而理解得出的解究竟意味着什么又是另一回事了。斯莫林后来承认：

在我的经验中，一名科学家只能产生少数几个好的想法。它们的数目是如此之少，彼此间的距离又是如此之远，而且只有经过多年的准备才会来临。更悲惨的是，有了一个好的想法之后，你还要花数年的时间去发展和完善它。㊟

事实证明，从这一初始的突破诞生，到物理学家对空间的量子本质产生一种真实的理解，并定义圈量子引力的范畴，还需要8年的时间。这一旅程包含三个步骤。

从圈到结

要研究圈量子引力理论，我们该从何处开始呢？这是一个关于引力圈的理论，因此我们或许可以通过探索圈（空间量子态）的性质得到很多收获，这就是关于纽结（knot）的理论。只要你系过鞋带，打过绳结，或者打过领带，你应该就对“结”很熟悉了。如果你听说如今在数学上有一大类理论专门研究纽结，可能会有些奇怪，但数学上的纽结与我们日常生活中遇到的绳结不太一样。首先，数学上的纽结出现在形成连续圈的物质中，而不是日常生活中单条一维的线绳（比如领带）或把单条线绳的两端系起来（如鞋带）所组成。

一个闭合的、没有打结的圈被称为无纽结圈（unknot），显然，它不包含纽结。最简单的纽结之一是三叶结（trefoil），如图17所示。这类物体是三维的，但为了把它们呈现“在纸上”并对它们进行一些操作，我们需要把它们投影到二维平面中，并展示出圈的哪些部分在其他部分之上，即压过了其他部分（而被压住的部分则通常被绘制成圈上缺失了一部分）。如果你花很长时间仔细把玩一个三叶结，你会发现它确实打结了——你不可能通过任何平滑的操作把结去掉。为了解开它，我们只能把绳子剪断，并把两段重新连接起来。

如果我们拥有了两个或者两个以上的圈，情况就会变得更复杂一些。两个圈可以形成链，即无法在剪断其中一个圈的情况下把它们分开。在看起来很邪恶的怀特黑德链环（以英国数学家J.H.C.怀特黑德的名字命名）中，一个无纽结的圈被另一个无纽结的圈在扭曲的状态下穿过，这样的两个圈无法在不剪断圈的情况下分开。这一图案出现在雷神的传奇战锤上。三个圈可以组成一个博罗梅安链环，它们看起来像一套类似九连环的智力玩具，但又有所不同：尽管任意两个环都没有相互穿过，但这三个环是一个整体，无法分离。

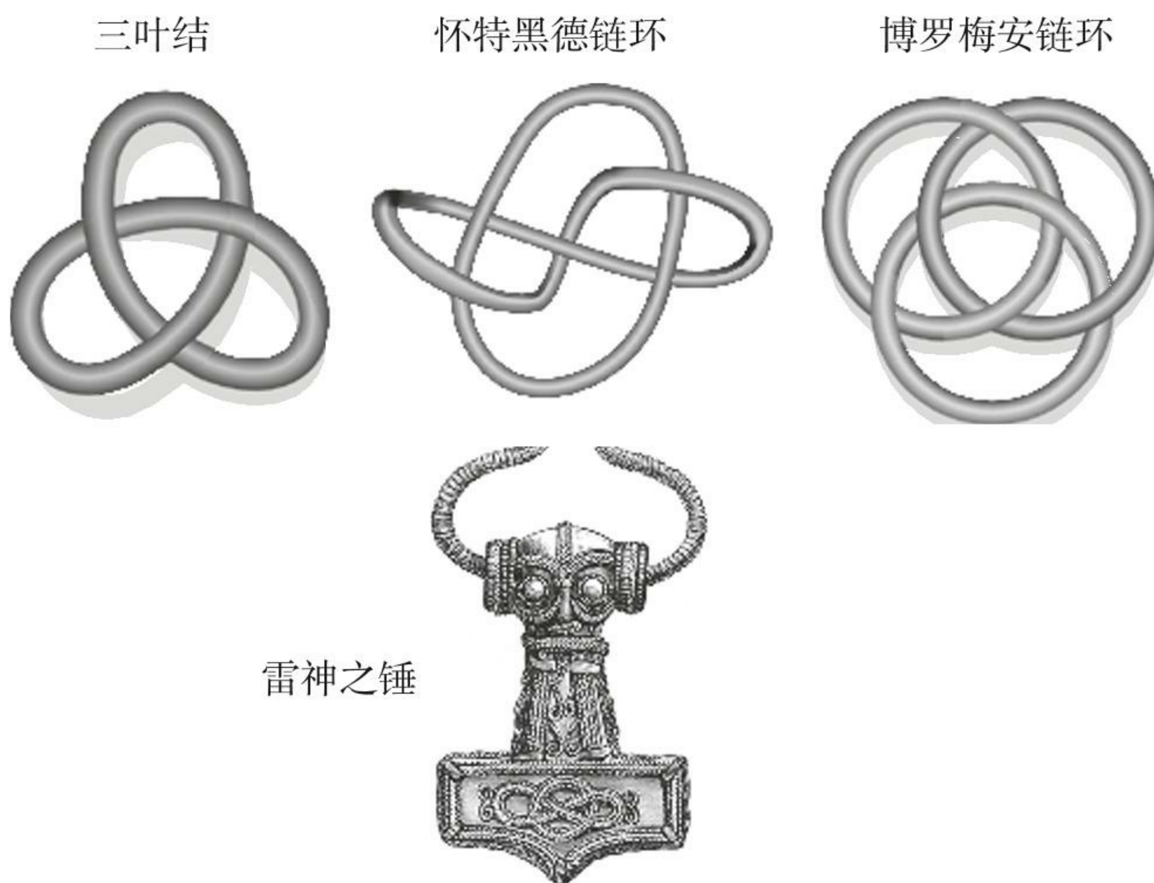


图17 几种纽结的例子，包括三叶结、怀特黑德链环（雷神之锤上的图案就是一个怀特黑德链环），以及博罗梅安链环

从雷神之锤的图案可以看出，纽结在人类历史上已经存在很长时间了。早期的纽结理论学家希望能构建一套数学语言，以描述一个含有大量扭曲结构的复杂的圈到底是否包含纽结，或者一系列圈的组合是不是

连成了不可分离的链环。㊟他们还想将所有可能出现的纽结和链环分成不同的类别（目前已知的纽结与链环有60亿种），并在它们之间建立数学关系。

纽结理论在物理学中的应用也有一段相对长的历史了，至少可以追溯到19世纪60年代。开尔文勋爵建立的原子涡流理论认为，原子是以太中的纽结和链环所形成的。在1869年发表的一篇论文中，开尔文描绘了一系列纽结和链环，其中就包括三叶结、相连的环以及博罗梅安链环。如今，纽结理论在自然科学中的应用十分广泛，包括拓扑量子场论，以及研究DNA（脱氧核糖核酸）、蛋白质等复杂生物分子物理学性质的领域。然而，它与圈量子引力的关系并没有那么大，其原因留待下文解释。

数学家和理论物理学家之间的关系令人捉摸不透。外人可能会以为数学家和物理学家之间会经常交流，定期地交换对各自领域中难题的看法，以及可能的解决方案。然而真相是，这两个群体之间并不经常互通信息。在斯莫林刚刚对纽结理论感兴趣的时候，克兰不得不提醒他，斯莫林自己已经在芝加哥见过纽结理论的全球领军人物之一——路易斯·考夫曼（Louis Kauffman）了。斯莫林的女朋友曾经在艺术研究所听过考夫曼关于纽结和艺术的系列讲座。

斯莫林和罗韦利使用纽结理论获得了一些进展，主要是给不同的可能量子态解分了类，但他们仍然不清楚这些态的物理意义是什么。他们遇到了两个问题。

自从薛定谔在1925年突破性地阐明了氢原子中电子的量子态，量子力学的语言就将大家的注意力吸引到了“可观测量”（observable）这一概念，以及与它们对应的“算符”（operator）上。可观测量是我们字面意义上能看见，或者说能通过实验来测量到的量，它们是我们赋予被观测物体的性质，如能量、动量、自旋等。

在量子力学中，每个可观测量都与一个对应算符有关。算符是我们可以应用于波函数的一项数学操作，如将它乘一个量，或者对它求微分。在量子力学中，如果我们将能量的算符（也可以是其他算符，仅以能量为例）应用在波函数上，就会得到一系列离散的、量子化的波函数的能量值——能量就是一个可观测量。

广义相对论属于经典理论，并不像量子理论那么依赖算符。注它描述的是质能与时空之间的关系，而如果我们把所有存在的物质都移走，在原则上会发生什么呢？这是第一个问题。圈量子引力原本想要的描述的是时空本身是如何演生出来的，但要以量子场论的形式重新表述，在缺乏物质的情况下，算符和可观测量就根本无法定义了。我们不能给空间安上一个算符，因此也就没有对应的可观测量。

第二个问题与时间有关。狄拉克此前发现，在广义相对论的约束哈密顿表述中，时间“消失”了。这一结果被延续至惠勒-德威特方程和ADM表述中。森、阿什特卡、斯莫林、雅各布森、克兰和罗韦利为进一步重新表述该理论所做的一切工作，都没能让时间维度重新出现。

这些问题表明，尽管用纽结理论可以找到一些解并对其分类，但它并不能告诉我们该如何诠释这些解。罗韦利和斯莫林不得不承认：“如何在物理学上诠释我们找到的这些圈态，仍是一个悬而未决的问题。”注

这个时候，斯莫林已经从耶鲁搬到了锡拉丘兹，以便与阿什特卡更密切地合作。他们俩的研究风格截然不同。阿什特卡理性、善于分析、重视方法，从不会在尚未仔细弄清楚一个问题的各种细节的情况下轻易声称找到了解决方法。他的性格也反映在他办公室的陈设上：他的办公室“是一座科学修道院，目光所及之处绝不会有任何散乱的论文纸页，胶带座、订书机和笔筒像军队一般在桌子上排列得整整齐齐”注。

而斯莫林则更冲动，时刻充满不安分的能量，他经常为了追寻一个

有创造性的捷径而先忽视细节（之后会补上）。斯莫林的办公室与阿什特卡的办公室只隔了三个房间，看起来却像是刚被飓风袭击过一般：书、杂志和衣物像垃圾一样被丢得到处都是，覆盖了所有能覆盖的地面。斯莫林曾表示：“我并不真的把这间屋子当办公室用，它更像一个衣橱。”[注]

罗韦利从意大利国家核物理研究所（INFN）获得了一份博士后奖学金，这份奖学金让他在选择研究地点方面有了一定的自由。罗韦利选择了罗马大学，当时意大利最杰出的理论物理学家，如詹尼·约纳-拉西尼奥（Gianni Jona-Lasinio）、乔治·帕里西（Giorgio Parisi）、尼古拉·卡比博（Nicola Cabibbo）和卢恰诺·马亚尼（Luciano Maiani）都在这里工作。在接下来的几个月里，他在罗马大学物理系的一间地下室里独自工作，钻研圈量子引力问题。

然而，罗韦利的奖学金只有一年的时间，而在奖学金到期时他也没能申请到其他资助。卡比博当时是INFN的主任，他听说了罗韦利与斯莫林一起做的工作，尝试为他争取新的资助，但没能成功。

这段时间对罗韦利来说格外艰难。罗韦利省吃俭用，加上从父亲那里得到的一些经济支持，总算能继续做一阵子研究。然而，他的研究前景看起来也很暗淡：在意大利，几乎没有一个人对他所做的课题感兴趣。在他考虑终结理论物理学术生涯的时候，博洛尼亚大学的老师们曾经的警告又在他的耳畔响起。罗韦利后来写道：“有那么一段时间，我的处境真的很艰难。”[注]

随后，1989年的一天，罗韦利接到了一个电话，问他是否有兴趣去美国匹兹堡大学担任助理教授。他的第一反应是拒绝这个邀请。他现在所在的地方可是繁华的“欧洲首都”罗马，他不想舍弃这里的生机与活力去往一个在他心目中沉闷无聊的无名的美国小镇。但一位好朋友的劝说让罗韦利迅速改变了主意：这将是一个千载难逢的机会，让他得以追寻

自己多年以来的科学理想。在美国做一名职业的科学家，总比在意大利当无业游民好。他接受了这一邀请，并于1990年前往匹兹堡。

如果说斯莫林与阿什特卡性格截然相反，那罗韦利就是给团队带来平衡的那个人。“我们三个人组织想法的方式都大相径庭，这可真是令人崩溃，”罗韦利解释道，“但我们在一起，就能理解每个人单凭自己不能理解的问题。”㊟

从纽结到编织

下一个重大进展出现在约1990年末、1991年初。在一间嘈杂的车库里等待汽修工人修好他的车时，斯莫林在笔记本上草草写下一系列方程。他发现了一种方法，可以构建并演算量子力学的算符来表示物理区域，以使得到的“谱”——该区域可以取的多种量子化的值——有限大，无须重正化。

这是他们几个月以来工作的高潮。在过去的几个月里，他们一直致力于发展来自QCD的新的数学手段，并试图使其适应背景无关的算符。在1991年6月于西班牙加泰罗尼亚举行的一场国际理论学会议上，斯莫林做了一系列报告，总结了这一工作。㊟

在1988和1989年的两个夏天，斯莫林都会前往意大利，与罗韦利一起度过“工作假期”。虽然1990年罗韦利去了匹兹堡工作，但他们在接下来的7年里仍然每年夏天都去意大利。这么做既有实际的原因，也有个人原因。罗韦利的父亲一开始介绍斯莫林住在他们家隔壁的单人间公寓里，罗韦利又介绍斯莫林认识了一位来自维罗纳的女性朋友，斯莫林很快与这位姑娘订了婚。“这些经历既改变了我的生活，也改变了我的科研事业，”斯莫林说，“圈量子引力理论要感谢（维罗纳的）香草广场和但丁广场周边的那些咖啡馆，我们有很多工作都是在那里完成的。”㊟

1991年夏天，斯莫林以访问科学家的身份去了离维罗纳只有一小时车程的特伦托大学。阿什特卡也加入了他们，三人一起尝试应用斯莫林新想出的数学技巧。

三人取得了一些进展。他们发展出一种结构，以描述相连的引力圈如何结合在一起，形成一种不断延伸的“编织”（weave）[注]。这再次暗示我们，我们以为空间是连续的，物体可以在其中平滑稳定地移动，但这只是宏观经典世界中的幻影，正如远看光滑连续的床单表面，近看其实由无数细密的亚麻或棉线交织而成。虽然床单远看是一个面，但线与线之间其实并不存在物质。

圈量子引力理论提出，在普朗克尺度下，空间是不连续的，由一个一个的基本单位或量子（也就是圈）组成。这些空间的基本组成单元以编织的方式组合在一起，与其说像连续的线编织成的床单，不如说像是环环相套形成的锁子甲[注]。罗韦利搜集了他能找到的所有钥匙环，把它们串在一起，为这类“圈空间”制作了一个三维物理模型（如图18所示）。他后来开玩笑说，他把维罗纳所有的钥匙环都用上了。

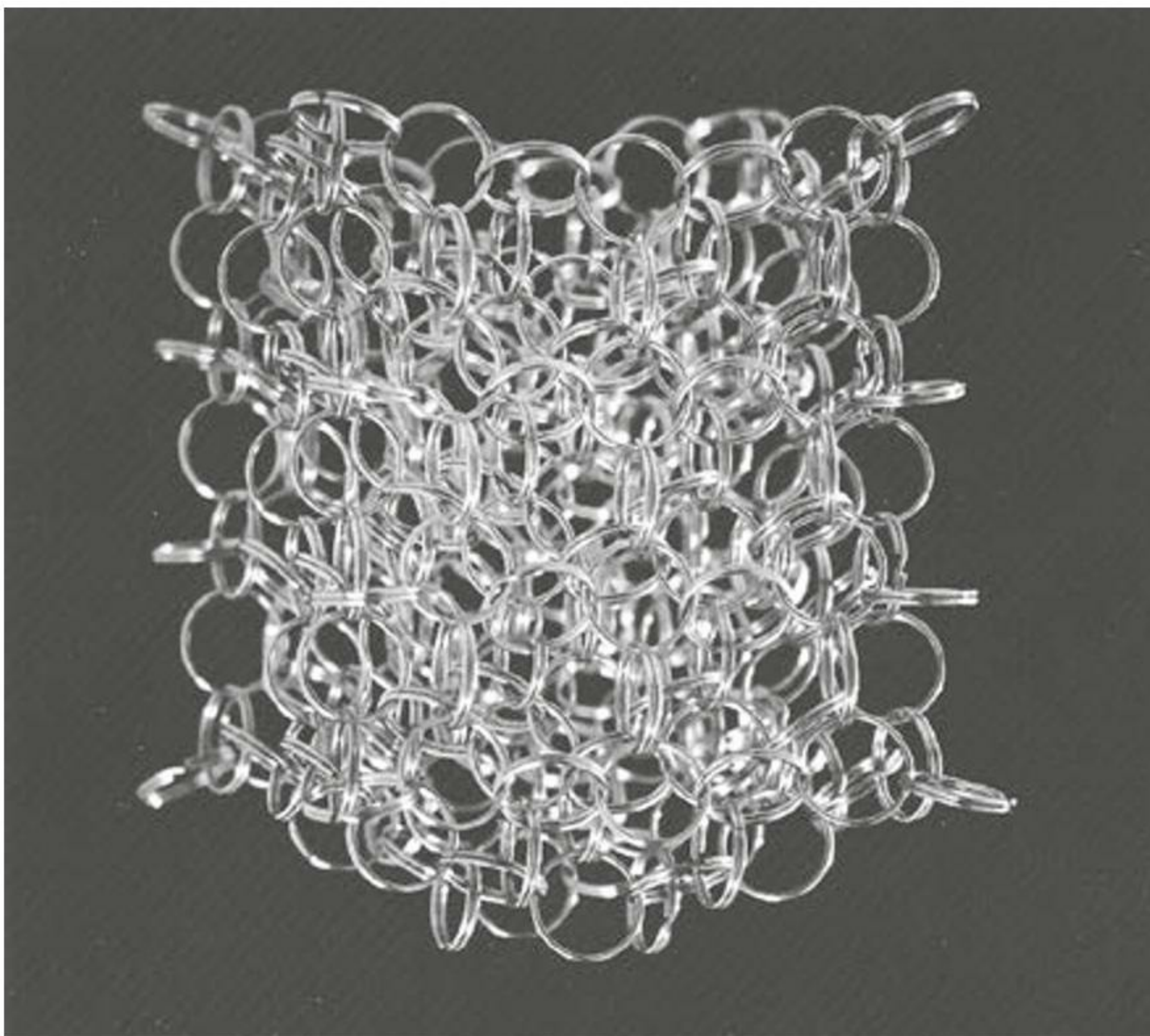


图18 为了展示连续空间如何由一系列的引力圈相串联、编织而成，罗韦利用了“维罗纳能找到的所有的钥匙环”，制作了这样一个三维模型

这类模型表明，空间不可能是连续变化的。在普朗克尺度上，一定有着某个最小面积或最小体积，永远无法逾越。永远不可能存在比这个面积更小的面积，也不存在比这个体积更小的体积。我们在日常生活经验中更为熟悉的面积和体积必定能从这个最小面积和最小体积导出。这些量之所以看上去能够连续变化，只是因为面积和体积的最基本单位实在是太小了，就像手电筒发出的光看起来像是连续的，但我们知道它其实由很多很小的离散的光子组成。

现在的难题就是用斯莫林的面积算符来清晰地展示理论是如何预言圈编织成时空形状的了。

从编织到自旋网络

1992年夏天，阿什特卡与斯莫林在一项美意联合科研补助金的支持下，再次来到特伦托。1993年8月，斯莫林与罗韦利在维罗纳又取得了一项重大进展。他们发现了一种方法，可以同时利用与背景无关的面积和体积算符构建出有限的哈密顿量。

1993年，宾夕法尼亚州立大学给阿什特卡提供了埃伯利物理学教授的职位，以及建立一个新的引力物理学与几何学研究中心的机会。他与校方谈判，说服校方同意他把斯莫林从锡拉丘兹带来，并争取到了另一个教职，它后来给了阿根廷理论物理学家豪尔赫·普林。

1994年，斯莫林仍然保持了夏天去意大利的传统。这次，他利用了位于意大利的里雅斯特的国际高等研究学校（SISSA）的访问讲师职位，的里雅斯特距离维罗纳大约两个半小时的车程。上午，斯莫林和罗韦利各自独立计算，然后在草药广场上的一家咖啡馆碰面，比对各自的结果。他们正努力尝试理解体积算符，事实证明它比面积算符难处理得多。罗韦利描述道：“它很难，因此它很有意思，它简直棒极了。”注

经过最后的冲刺，他们解决了这个问题，摆在他们面前的情形又改变了。

他们的计算表明，圈之间的串联远不如它们产生的网络重要，因此罗韦利的钥匙环模型已经过时了。不应该把重点放在理解圈之间是如何相交的、在哪里相交的，在新的描述中，交点本身才是更重要的，它们成了网络中的“节点”。将体积算符用在节点上，就得到了可观测量：在

节点处特定数目的量子体积。

那节点之间相连的力线呢？这些力线现在就表示相邻节点的小体积之间相接的面，因此用面积来表示。将对应的面积算符用在力线上，得到了一系列面积，它们与普朗克长度的平方有关——这是个极其微小的面积，只有3×10^{-70}平方米。

由此，这样的网络就由两组数来描述：节点处的体积可观测量量子数，以及节点之间连线的面积可观测量量子数。事实证明，面积量子数（以j来表示）可以取整数和半整数的值，如0、1/2、1、3/2、2、5/2等。㊟

斯莫林突然意识到，这种网络他曾经见过。

我在第7章开头说过，理论物理学家从来都不是面对着一张白纸或者一张空白的画板开始工作的。不过，仍然有一些理论物理学家把整个职业生涯都建立在放飞的想象力上，他们的草稿纸或者白板上只有极少一部分是必需的物理学公式，其他地方都是空白。这类理论物理学家倾向于从别具一格的角度切入问题，即“跳出框架来思考”。

这类理论物理学家中的一位就是牛津大学的数学物理学家罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）。

彭罗斯的研究动力并不总是为了解释令人迷惑的经验事实。只要感到一个被广泛接受的物理学理论破坏了数学的优美性或者他珍视的哲学观点，或者仅仅是“感觉不太对劲”，他就觉得有必要研究一下。而这成了通往量子引力理论的第三条路：既不是从广义相对论出发，也不是从量子理论出发，从某种重要的意义上，几乎是从零开始、白手起家。

马赫（以及随后的爱因斯坦）尝试把所有的物理学规律总结成物理对象之间的一系列关系和相互作用，这些关系和相互作用是不依赖背景

时空假设的。然而，量子力学不仅依赖这类背景的存在，还需要其被看作一个连续的、光滑的变量。原子内部微观物体（如电子和夸克）的能量、线动量和角动量可以是量子化的，但它们所处的空间需要是光滑连续的。

这感觉不太对劲。

1971年，彭罗斯向自己提出了一个看似简单而无害的问题：有没有可能把连续的时空换成一个仅由物体之间的相互作用构成的系统？

> 我自己的目标是尝试用离散的组合量的方式描述物理学，因为当时我相当坚定地认为，物理学定律和时空的结构从根本上应当是离散的，而非连续的。此外，另一个驱动我研究的动力来自马赫原理的一种形式，它认为空间的概念本身应该是被导出的，而非原本就存在的。[注]

彭罗斯的伟大的想法是根据已经量子化的基本概念建立一种结构，让连续的概念作为一种极限情况（即近似）出现。但应该选择哪些概念呢？他毫不犹豫地开始研究自己眼中“最有量子力学特征的物理量”：自旋。[注]

我在第4章提到过自旋。电子拥有一种内禀角动量，由一个叫作自旋量子数的量来表征，其大小固定，为1/2。这意味着电子在磁场中可以“指向”两个不同的方向，我们可以称其为“自旋向上”和“自旋向下”。然而，彭罗斯想知道这个问题的答案：“电子是怎么知道哪个方向是‘上’，哪个方向是‘下’的呢？”[注]这很明显是我们先假设了一个背景时空，然后强加给电子的方向。[注]要去除背景时空，就意味着我们只处理总自旋角动量——由所有物体的自旋加起来而得。总自旋并不要求我们事先规定一个方向。

随后，彭罗斯设想了一个完全只由带着自旋角动量的物体构成的宇宙。这些物体并不一定是基本粒子，目前阶段我们仅把它们看作“物

体”。自旋角动量是量子化的，因此物体只能携带一个固定自旋角动量基本单位的倍数，这个单位是$1/2\hbar$，$\hbar$即普朗克常数h除以2π（约为1×10^{-34}焦耳秒）。换句话说，每个物体携带的角动量为$n\times1/2\hbar$，其中$n=0$，1，2，3等自然数。在彭罗斯的理论中，网络中的线就以这个整数n来标记。[注]

彭罗斯得到的结果就是所谓的自旋网络（spin network），见图19。这一结构与物理学结合，为物体之间的结合方式建立了某种规则，从而保证总自旋角动量永远守恒。

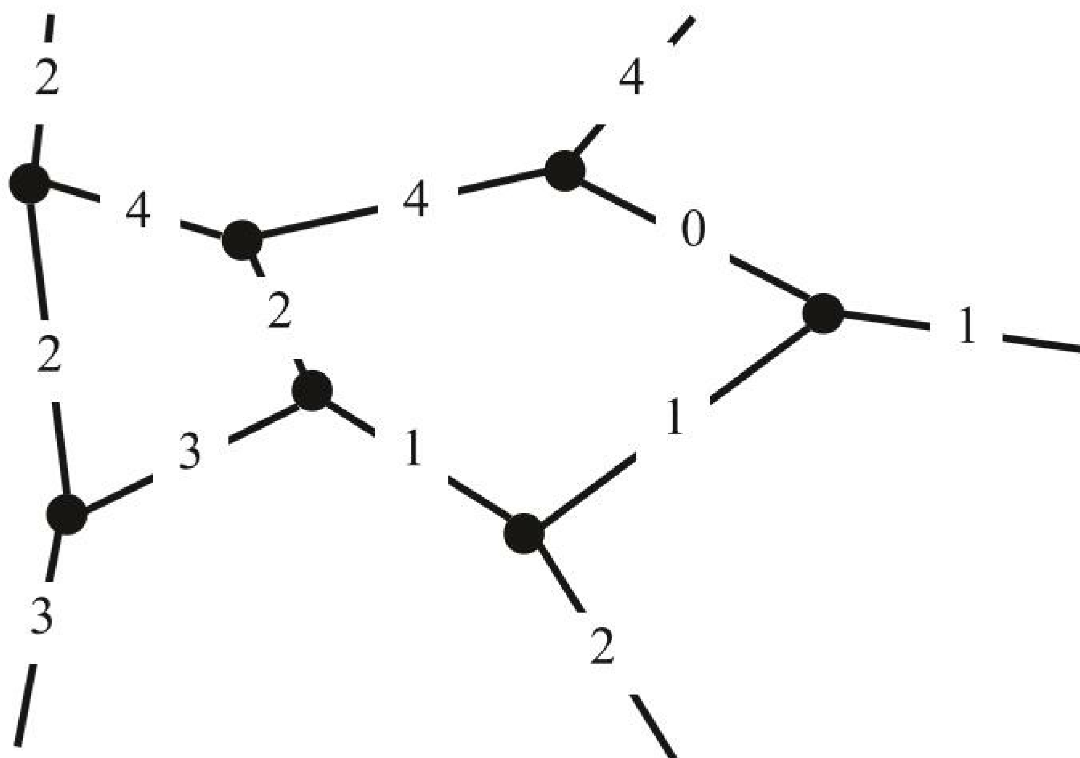


图19 在尝试设计一种既离散又有相关性的空间描述的过程中，彭罗斯使用自旋角动量的基本概念发展出了自旋网络。图中就是一个自旋网络的示例

要理解这一切是如何运作的，不妨假设我们有一个物体携带着3个单位的自旋角动量，因此我们在一条线上标上“3”。这一物体并不会四处运动（因为我们假设时空不存在），但它可以分裂，也可以与其他物

体发生相互作用，因此能对自旋角动量进行传递或者分配。比方说，带有3个单位自旋角动量的物体可以分裂成一个带有2个单位自旋角动量的物体和一个带有3个单位自旋角动量的物体，后者再与带有1个单位自旋角动量的物体结合形成一个带有2个单位自旋角动量的物体，以此类推。这些过程十分抽象，但我们要说明的只是这样一点：在该结构中，唯一重要的只是物体及其自旋值之间的拓扑关系。

彭罗斯证明，只要网络的总角动量足够大，就能以其自身构建出逆着其他可被测量的大型网络的相对定向的方向。想象有这么一个自旋网络，它拥有很大的总自旋角动量（例如为N），现在我们将一个单位的自旋角动量传递到另一个大的自旋网络（总自旋角动量为M）中。在这个过程中，有一定概率这一个单位的自旋角动量会加到第二个自旋网络中（得到M+1），也有一定概率第二个自旋网络会被减去一个单位的自旋角动量（得到M-1）。彭罗斯证明，这些概率之间的关系定义了两个网络之间的夹角。不仅如此，他还证明，所有这类夹角之间的关系，与三维欧几里得空间中的夹角关系完全一致。这表明，常规的空间和几何学从大的自旋网络中的一系列相互关系中演生了出来。

彭罗斯的本意并不是设计出一种新的量子力学表述形式。他写道：

我并不想表明描述我们宇宙的正是这一图像，或者是与其类似的东西。但也许我描述的这一模型中的某种本质特征会在更实际的场景中得到应用。(注)

彭罗斯在开始构造这一理论时，完全没有预先在大脑中设定任何理论的形式结构，他只是基于空间应该是离散且相关的这一想法，想出了自旋网络的结构。实际上，彭罗斯的这种理论仅包含一个想法：自旋网络不足以构成一整个研究课题（彭罗斯本人花了更多精力在通往量子引力的另一条道路——扭量理论上面）。

雅各布森在圣巴巴拉听到了关于相交圈的解，他立马将其与彭罗斯

的自旋网络联系了起来。他至今都能回忆起当时的激动。彭罗斯也出席了1986年的那场研讨会，雅各布森和斯莫林还曾向他讨教自旋网络方面的工作。彭罗斯告诉两人，他之前准备了一些手写的讲义，并答应给他们发一份复印件。雅各布森大为惊喜，还花了很多时间学习自旋网络的机制。

斯莫林肯定早在哈佛读博的时候就听说过自旋网络了。“我真的搞不明白自己为什么花了这么长时间才意识到自旋网络可以被看作圈量子引力的基础。”他承认。[注]但是，与自旋网络相关的计算令人望而生畏：它们极为复杂，又容易出错，只要一个简单的正负号错误就会给整个结果带来灾难性的影响。不过，斯莫林还是勇敢地接受了这一挑战，并在1994年访问牛津，直接向这系列计算的发明者彭罗斯本人请教。

这是一项卓越的成就。彭罗斯之所以发展出自旋网络，只是因为他感觉连续时空的观念不太对劲。把阿什特卡的广义相对论自旋联络表述量子化，就得到了引力的“圈”和“纽结”，然后得出一个由圈编织起来的空间。斯莫林和罗韦利如今已经找出了应用体积与面积算符的方法，并且证明圈量子引力理论中的空间是离散而相关的，在他们推进这一工作的过程中，彭罗斯早已建立的自旋网络理论就在背后静静地看着他们。

应用体积算符，就会得到自旋网络节点处的离散“颗粒”，即量子化的空间。应用面积算符，就会得到网络中的连线上（即离散颗粒相连的地方，如图20所示）的量子化的面积。这些颗粒极为微小，一个质子里装得下多达10^{65}个这样的体积量子。从一个颗粒移动到相邻颗粒形成的闭合回路就是圈量子引力理论中“圈”的起源，而圈上每条线所带有的值的总和就反映了引力场的强度，即空间弯曲的程度。

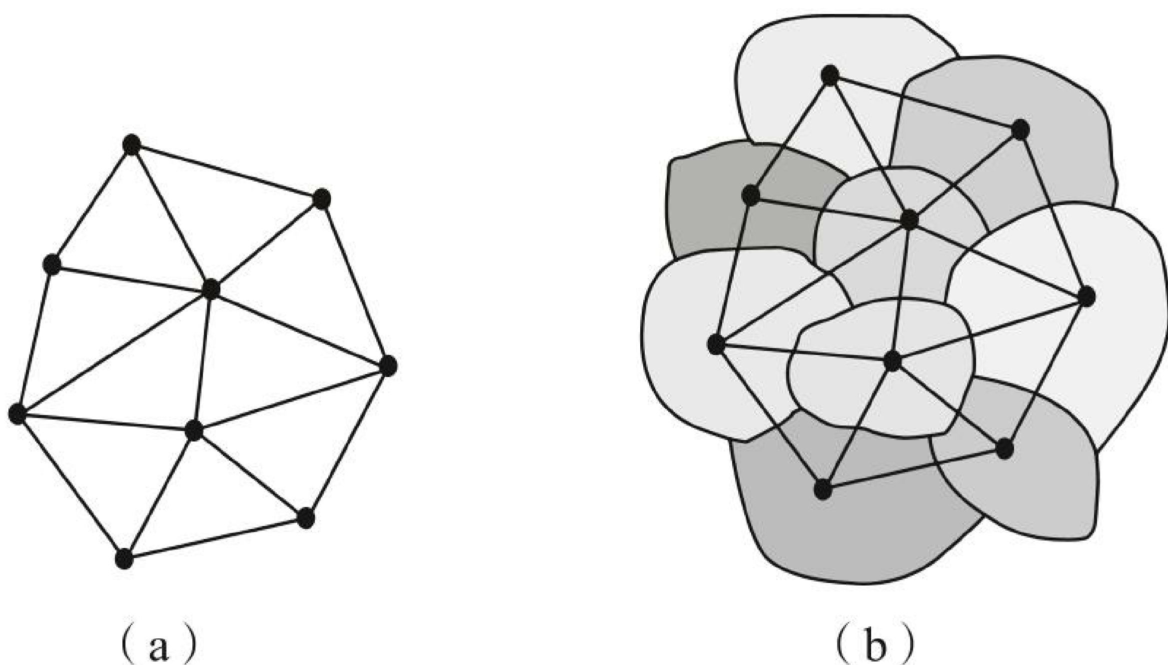


图20 （a）斯莫林和罗韦利应用了彭罗斯的自旋网络，将节点替换成空间的体积量子；（b）将节点之间的连线替换成体积量子之间相接的面的面积量子

这趟旅程曾经充满困惑、沮丧，甚至绝望，而且远未结束，但此时斯莫林和罗韦利感受到了少有的真正的欢欣。他们发表了两篇关键的论文，一篇关于面积与体积的离散性，另一篇关于量子引力与自旋网络之间的联系。[注]这两篇论文代表了他们最引以为傲的科学发现，也是他们在圈量子引力方面被引用次数最多的论文。

这可称得上是个硕果累累的夏天了。

但在圈量子引力理论方面，要做的事情还有很多。在接下来的几年里，斯莫林和罗韦利继续和阿什特卡合作，他们的队伍里还加入了其他的理论物理学家，包括普林、耶日·莱万多夫斯基（Jerzy Lewandowski）、鲁道夫·甘比尼［Rodolfo Gambini，他与安东尼·特里亚斯（Anthony Trias）一同独立发现了同样的圈方法，并尝试将它用于QCD］、雷娜特·罗尔（Renate Loll）、劳伦特·弗赖德尔（Laurent Freidel）和托马斯·蒂曼（Thomas Thiemann）等人。在引力物理学与几

何学中心，一位又一位博士后、助理研究员和访问学者来了又去，相继成为该领域的领军人物。

阿什特卡与莱万多夫斯基为面积与体积算符建立起更加严谨而健全的数学框架，他们从中导出了斯莫林与罗韦利之前得到的结果，还扩展了体积谱，并发展出了关键的新技法。

普林则贡献了一个极为关键的新想法。他此前提出，将体积算符用在无节点、非相交的圈上会得到一个零体积的结果。[注]网络中的每个节点都由一个特定的体积量子数表征，把庞大网络中所有的体积量子数相加，就得到了我们平常感受到的空间的体积。方程清楚地表明，圈的相交才是关键，如果没有节点，就不存在体积，也不存在空间了。

不过这其中也有微妙之处。斯莫林在科学生涯中所经历的最艰难的时刻之一，就是1995年夏天在华沙举行的一场会议上，雷娜特·罗尔站起来宣布斯莫林与罗韦利关于最小可能体积的计算是错误的。他们此前使用的“三价”网络（即每个节点与三个节点相连）导出的最小体积其实是零。“我们花了很久才把关于体积的事情搞清楚，”罗韦利承认，“而且当时我们还是有些困惑，因为我们从一开始就错了。”[注]在经过了24小时疯狂的检查之后，斯莫林发现他在整个计算过程中犯了一个正负号的小错误，罗尔是对的。最小的可能体积应该通过“四价”网络（即每个节点与4个节点相连）得出。

但从这个错误中，这两位理论物理学家也学到了一种新的计算方法，这比彭罗斯教给他们的方法简单得多，也可靠得多。

至此，从阿什特卡用他的新变量来重新表述并大幅简化广义相对论的ADM哈密顿形式以来，十年的时光像潺潺流水从桥下流过一样逝去。理论物理学家已经为方程的解找到了一种物理诠释，将空间的体积与面积视为可观测量。

然而，关于时间，这个理论还有很多令人烦恼的问题。

---

1. Ted Jacobson and Lee Smolin,‘Nonperturbative Quantum Geometry’,Nuclear Physics B,299 (1988),295.This quote appears on p.343.
2. Ted Jacobson,personal communication,8 December 2017.
3. Carlo Rovelli,quoted by Manjit Kumar,‘Theory of (Almost) Everything’,Literary Review,December 2016,available at https://literaryreview.co.uk/theory-of-almost-everything.
4. Lee Smolin,Three Roads to Quantum Gravity: A New Understanding of Space,Time and the Universe,Phoenix,London,2001,p.129.
5. Carlo Rovelli,What is Time? What is Space?,manuscript translated by J.C.van den Berg,p.13.Published by de Renzo Editore,Rome,2006.
6. Smolin,Three Roads to Quantum Gravity,p.129.
7. Ibid.,p.130.
8. Abhay Ashtekar,personal communication,11 December 2017.
9. Carlo Rovelli,personal communication,15 December 2017.
10. 罗韦利在1998年的一篇综述中提到了这个名字，但这个名字过了很多年才流行起来。其他的理论物理学家提出了不同的名字。亚历杭德罗·科里基回忆道，在1996年一场酒吧里的讨论中，物理学家大多还将这一理论称为“非微扰量子引力的圈表述”。（引自2017年11月21 日作者与科里基的个人交流）
11. Smolin,Three Roads to Quantum Gravity,p.131.
12. 雷神（Thor ）是北欧神话中的雷霆和力量之神，其武器是一把战锤。——译者注
13. 以纽结的图案来装饰雷神之锤的传统延续至今。如果你是漫威电影宇宙系列电影的粉丝且善于观察，就会发现电影中的雷神之锤上装饰着一个简单的三叶结。
14. 所有曾经被电视、机顶盒、DVD 播放器、音响系统背后的一团乱线搞得崩溃的人，一定都思考过这种问题。
15. 与广义相对论有关的经典的可观测量是非局域性的，而且极为复杂。因此，想要导出对应的量子力学算符也极其困难。
16. Carlo Rovelli and Lee Smolin,‘Knot Theory and Quantum Gravity’,Physical Review Letters,61 (1988),1158.
17. Marcia Bartusiak,‘Loops of Space’,Discover,April 1993,p.66.
18. Lee Smolin,quoted in ibid.,p.66.
19. Rovelli,What is Time? What is Space?,p.16.

20. Carlo Rovelli,quoted in Bartusiak,‘Loops of Space’,p.66.

21. Lee Smolin,‘Recent Developments in Nonperturbative Quantum Gravity’,in Quantum Gravity and Cosmology,Proceedings of the 1991 GIFT International Seminar on Theoretical Physics,held in Saint Feliu de Guixols,Catalonia,Spain,World Scientific,Singapore,1992.See also arXiv:hep-th/9202022v1,7 February 1992.

22. Lee Smolin,personal communication,29 December 2017.

23. Abhay Ashtekar,Carlo Rovelli,and Lee Smolin,‘Weaving a Classical Geometry with Quantum Threads’,Physical Review Letters,69 (1992),237.See also arXiv:hep-th/9203079v1,30 March 1992.Ashtekar actually took weaving lessons so that he could better understand the process.

24. 一种由大量小铁环互相串联制成的盔甲。——译者注

25. Carlo Rovelli,personal communication,26 December 2017.

26. The spectrum of area is proportional to $8\pi l_p^2\sqrt{j(j+1)}$,where l_p is the Planck length,1.6×10^{-35} metres.In fact,Rovelli had been puzzling over a formula which featured the square root $\sqrt{p^2+2p}$,where p is an integer.Junichi Iwasaki,then a student,stormed into his office and demanded that he rewrite the equation settinj=½p.This transformed the formula into an expression immediately recognizable from the quantum mechanics of angular momentum.

27. Roger Penrose,The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe,Vintage,London,2005,p.947.The italics are Penrose’s.

28. Roger Penrose,The Emperor’s New Mind: Concerning Computers,Minds and the Laws of Physics,Vintage,London,1990,p.341.

29. Roger Penrose,‘Angular Momentum: An Approach to Combinatorial Space-time’,first published in Ted Bastin (ed.),Quantum Theory and Beyond,Cambridge University Press Cambridge,UK,1971,pp.151–80.This book is now out of print but you can retrieve a copy of this chapter from John Baez’s website: http://math.ucr.edu/home/baez/penrose/.This quote appears on p.2.

30. 当然，电子自旋的方向只在电子经过磁极之间时才显示出来，因此磁极本身规定了一个“方向”。但这并不能回答彭罗斯提出的问题，因为磁极的方向也需要在时空中被事先指定。

31. In fact,Penrose’s integers n are equal to 2j,where j is the total spin angular momentum quantum number.The total spin angular momentum along a line in the spin network is then given by $\hbar\sqrt{j(j+1)}$,exactly analogous with the area spectrum of LQG.Of course,Penrose’s n is the same as Rovelli’s original p (see endnote 20).

32. Penrose,‘Angular Momentum’,p.4.

33. Lee Smolin,personal communication,29 December 2017.

34. The two papers are: Carlo Rovelli and Lee Smolin,‘Discreteness of Area and Volume in Quantum Gravity’,Nuclear Physics B,442 (1995),593–619 (arXiv:gr-qc/9411005v1,2 November 1994); and Carlo Rovelli and Lee Smolin,‘Spin Networks and Quantum Gravity’,Physical Review D,52 (1995),5743 (arXiv:gr-qc/9505006,4 May 1995).

35. 这就解释了为什么斯莫林和雅各布森在圣巴巴拉所得到的零体积的解不代表物理实体。

36. Carlo Rovelli,personal communication,15 December 2017.

第10章 时间真的一去不复返吗

1995年5月，卡洛·罗韦利和李·斯莫林在《核物理学B》期刊上发表了一篇论文，总结了他们关于面积与体积离散性的工作。在论文中，他们宣布："如果有人以普朗克尺度的精确度测量了一个物理区域的体积或是一个物理表面的面积，他们就会发现体积或者面积落在我们给出的离散谱里。"[注]

位于日内瓦的CERN拥有世界上最大的高能粒子对撞机，它平常探测的粒子尺度大概为10^{-18}米，因此，普朗克尺度（10^{-35}米）远不是我们短期内可以用实验手段探测的。然而，没有人能否认理论物理学家的成就的本质。在广义相对论和量子理论诞生超过80年后，它们仍然没有统一，但如今，通过一些理论物理学家的勤奋工作，我们看起来离最终的解决方法不远了。

总结一下前文：圈量子引力理论是人们尝试把从广义相对论中得到的一切关于时空本质的知识放到一个类似量子场论的框架中所得到的理论。它产生了一组方程，我们无须经过混乱而乏味的重正化过程就能得到它的解，而它的解被证明与我们选择的坐标系完全无关，也就是说与任何一种时空背景无关。不仅如此，这个理论完全基于广为接受的、经过经验检验的数学结构，我们无须进一步引入新的物理现实，如超对称或隐藏维度等。

然而，该领域的物理学家所感受到的喜悦只持续了很短的一段时间。就在罗韦利和斯莫林的论文发表几个月前，爱德华·威滕在一场大会上讲的一段话掀起了第二场超弦革命。

理论物理学家对超弦理论的兴趣在1984年掀起了第一场超弦革命。

1987年，新论文的数目与迈克尔·格林和施瓦茨的原始论文被引用的次数达到顶峰。[注]然而，随着超弦理论的问题逐渐显现出来，它的热度也开始逐渐衰减。

最大的问题在于，超弦理论不是唯一的。超弦理论变体的数目，以及可能存在的隐藏额外维度所需的卡拉比-丘空间的数目都在急剧增加，物理学家无法决定该选择哪一个。超弦热潮让很多人受益，但久负盛名的院校机构能提供的职位越来越少。1994年末，几位原本被吸引来研究超弦的理论物理学家对该领域失去了希望，纷纷转换研究方向。

不过，一些固执的物理学家还在坚持。对于他们而言，超弦理论仍然充满希望。他们认为它的数学结构实在太优美，因此一定在描述大自然的过程中扮演了某种角色。不仅如此，超弦领域发展到这个程度，想要刹车已经不可能了：该领域可以说是“大而不能倒”（too big to fail）[注]。超弦理论物理学家确信这是通往万物理论的唯一途径，是“仅存的独苗”[注]。许多人完全没有意识到，通往万物理论乃至通往量子引力理论，还存在别的路径。

此前，已有几位弦论物理学家通过超引力的计算表明时空维度数目应该是11，不是10。维数多得似乎有些难以控制。然而，1995年3月，在南加州大学举行的一场弦论会议上，威滕提出了一个大胆的猜想。他提出，或许5种不同的10维超弦理论，以及超引力理论，其实都是一个理论的近似。这个理论包含了11个维度，威滕将其称为M理论。他没有特意解释这里的“M”代表什么意思。

然而，超弦理论只有10维，没有第11维。要再加上一个维度，我们只能把弦本身重新诠释为一个更高维的物体，即膜（membrane，这或许是M理论中“M”的来源）。理论物理学家的研究重点马上从弦转移到了膜，英国著名弦论学家甚至把M理论直接称为“我们之前所说的弦论”。[注]

但这只是个猜想，还不能算是理论。威滕证明了10维超弦理论与11维超引力理论的等价性，但他还没能把M理论表述出来，只能推断这样的理论一定存在。根据我的经验来看，很多弦论科普作品的读者都忽略了这一点。**M**理论还不是一个理论。直到如今，都没有人知道M理论看起来是什么样的，尽管很多理论物理学家通过推测他们认为M理论可能具有怎样的结构，或者应该具有怎样的结构，做了一些修修补补的工作。M理论其实是一个假设，即假定存在一个唯一的11维超弦理论。

然而，这样一个假设足以让超弦理论潮流再起，甚至比上次势头更旺。超弦理论再次火了起来，关注度剧增，各机构拼命地挤出职位以招聘研究弦论的教职员工。[注]没过几年，弦论已然成为探索物理学“大问题”的首要理论，至少畅销的大众科学书籍——如布赖恩·格林1999年首次出版的《优雅的宇宙》（*The Elegant Universe*）都这样振振有词地解释。

其实，我们并不是非得在不同的研究方法之间选择一个。严密的科学逻辑告诉我们，所有的路都值得我们去探索，看看它们通往什么地方，而且确实每条路都有科学家在走。不过，自从弦论的第二次革命爆发以来，物理学家在量子引力理论上投入的精力已经严重偏向了弦论（或者说M理论）这一边。

发展一种科学理论很像下赌注。当你在两件事之间做选择的时候，理性的人都会选择能让期望效用最大化的那一件。然而，世界如此复杂，有时候完全无法预测，我们怎么能知道如何采取行动才能让期望效用最大化呢？我是应该把钱存在银行里，还是应该拿来炒股？我可以尝试计算每种行动能带来自己想要的结果的概率，并选择概率大的那一种。我也可以不计算这类概率，只看一眼银行利率，再研究一下股市，客观地比较一下。我还可以只从很主观的角度看待这些不同的选择，同时考虑我自己倾向于承受多高的风险。

如今，每年全球学术界能提供的科研职位、博士后助理职位的薪水，以及学生奖学金、访问补助金乃至计算机机时费，都是有限的。在美国，提供给弦论研究的资金大多数来自美国国家科学基金会（NSF）的高能粒子物理学分支，以及能源部的预算；提供给圈量子引力研究的资金则来自NSF的引力物理学分支。因此，这两个领域并没有面临直接的竞争。[注]然而，引力物理学分支还要给LIGO提供经费，而在艰难分配各个项目的经费时，难免要考虑到它们的价值孰高孰低，无论它们是否属于同一个预算部门。

如果一定要在弦论和圈量子引力之间做一个直接的选择，我们该如何判断它们最终发展成一个被理论物理学界广为接受并当作量子引力问题最佳答案的概率呢？

我会说，就我个人而言，这个概率取决于每个理论核心的伟大想法的本质（以及数目），毕竟所有的风险都来自这些核心想法。超弦理论基于两个想法——弦和超对称，而这两个想法至今都没有得到经验证据的支撑。弦也好，超对称也好，都是在解决现有的被广为接受的理论结构所存在的问题（如点粒子和等级问题）的过程中，基于物理学家对“自然可能是什么样”的揣测而得出的。

这一过程与古希腊哲学家提出自然可能由原子和虚空组成的过程，其实并无太大的差别。当然，古希腊哲学家并没有今天的弦论学者所拥有的复杂精致的数学框架，但不管怎样，单靠数学无法将形而上的思索变为经验现实。只有实验科学才能完成这一过程。

为了将理论与现实结合起来，就必须考虑超弦理论如何卷曲额外维度的问题。格拉肖写道：“你可能会问，弦论研究者为什么坚持空间是9维的呢？他们可不是通过精妙的推理或者有力的哲学论证来证明这一点的。他们认为空间是9维的，完全只是因为弦论在其他任何一种空间里都无法存在。”[注]再加上一个新的伟大想法——M理论，我们就开始觉

得，我们正在建造的“房子”虽然看起来精致，却如纸牌屋一般不堪一击。

形成鲜明对比的是，圈量子引力只基于一个伟大想法，它用一种数学技巧重新表述，并大幅简化了广义相对论，让它接近量子场论的形式。其他所有的概念——力圈、纽结、链环、自旋网络，以及量子化的面积和体积，都能在应用这种物理学家在粒子物理标准模型的量子场论中已谙熟的技巧的过程中自然导出。圈量子引力理论是基于人们关于自然的已知事物而建立起来的，其自身的正确性完全能用广义相对论和量子理论来证明。

诚然，这些结构在物理学家努力捏合的过程中已经扭曲得不成样子了，因此也让我们怀疑它们是否真实存在。有些人认为，弦论更为严密，在数学上更精确、更一致，其结构定义也更清晰。然而，这种自洽性很大程度上来自超对称的假设，而且随着CERN的大型强子对撞机的ATLAS与CMS探测器合作组的结果不断发表，超对称的科学根基正在被不断削弱。

我认为，从我们关于自然已知的事物出发，总归要比从我们认为（或者说希望）自然可能拥有的性质出发要更好一些，尽管为此要牺牲一些数学上的严格性与一致性。哪怕只是稍微了解一下科学史，你都会发现缺乏数学上的一致性并不会阻碍真正的科学发现。从相对论出发研究量子引力理论，需要我们赌一把，但对于整个世界来说，这是个有把握赢的选择。圈量子引力的方法更接近我们此前构建量子场论的思路，而量子场论已经成为极为成功的理论，是当今粒子物理标准模型的基础。

当然，圈量子引力理论的缺点也不少。1995年，超弦理论仍然有希望成为一种万物理论，而从相对论着手的圈量子引力理论只能成为一种量子引力理论而已。[注]约瑟夫·康伦（Joseph Conlon）写道：“事实已经

证明，弦论包含的内容比量子引力多太多了。正因为它的内涵如此丰富，它才吸引了如此多的科学家。”[注]在量子场论的熏陶下成长起来的粒子理论物理学家很想知道引力子到底是什么，他们也习惯于在有背景时空的情况下做研究（或者说，他们根本没有意识到背景时空的存在会成为一种问题），因而并不操心时间维度消失的问题。

令人忧伤的是，这两种理论都没有发展到能做出预测，以有机会让实验物理学检验大自然究竟青睐哪一种的地步。物理学家完全没有实际的手段来在这两种理论间做出选择，因为这两种理论描述的都是极小尺度（即极高的能量）上的现象，因此在相当长的一段时间内，实验物理学想要接近它们的范畴都是不可能的。

但如果我们想真正理解1995年之后的理论物理学界发生了什么，就必须将这种实用主义的基本原则与人们的心理结合起来分析。在2006年首次出版的《物理学的困惑》这本书中，斯莫林列举了一些他认为弦论圈子里的人共有的性格特征：[注]

- 极度自信（我要加上一句：“有时候接近于傲慢自大”）[注]；
- 有很强的群体共识和身份认同（群体思维），群体内部和群体外部存在清晰的界线；
- 对群体之外的成员的观点完全无视，丝毫不感兴趣；
- 总是倾向于从过分乐观的角度阐释证据（我会进一步将其总结为“证真偏差”——倾向于只关注能支持或确认该群体所持有的先入之见的证据）。

这些特征不可避免地让人联想到支持某些政党、教会或异教团体的狂热分子，[注]斯莫林也暗示了这一点。早在1988年，谢尔登·格拉肖就写道：“根据这一门新的宗教……弦论的想法更适合数学系甚至神学系

的人来研究。针尖上能站立多少个天使？比针尖小30个数量级的空间中能容纳多少个维度？中世纪神学又复活了吗？”[注]

我们确实可以用某种完全理性的标准来判断这两种量子引力理论中哪种更可能成功，但忽视“科学是人类造就的”这一点将是极为愚蠢的行为。对于理论的判断，会不可避免地掺杂一些不理性的考虑，受到观念、文化、群体领导者的价值观，以及他们行使权力和施加影响的方式的影响。拥有较大权威的人会设定标准，其他人则以这些标准来判断科学研究的价值，并相应地给予回报。这些标准可能会极大地影响经费申请，以及拥有世界上最聪明的头脑的人能否被最有名望的科研机构录取。

罗韦利仍然能回想起2008年他在一场备受瞩目的举办于CERN的弦论年会上的经历。尽管圈量子引力领域的会议通常都会邀请弦论研究者参加，但他受邀出席这场会议引起了一些弦论忠实信徒的不安。年轻的弦论研究者很好奇罗韦利会讲些什么，但戴维·格罗斯在总结发言中对圈量子引力做出了一个非常负面的评价：“弦论能吸收理论物理学中的一切内容，除了圈量子引力。但我们没有兴趣吸收圈量子引力理论。”[注]

我在企业界曾经听到过这样一句名言：“老板感兴趣的事情，我都感兴趣。”如果弦论圈是个教会，那威滕毋庸置疑是教皇。在《为什么是弦论？》（*Why String Theory?*）中，康伦承认了威滕的影响力：“他所研究的内容自然而然地流行了起来。只要他认为哪个课题重要，那个课题就会火起来。研究这门学科的聪明人有很多，但大埃德[注]可只有一个。”[注]斯莫林记得有好几次，弦论研究者突然就对某个看似与他们的研究方向毫无关联的新进展产生了兴趣，这是因为他们看到威滕在图书馆阅读这方面的内容。这群人更是把“埃德怎么说？”这句话挂在嘴边，每当会议上有人做报告之后斯莫林就会听到这句话，他都要被惹烦了。[注]

对于当代理论物理学而言，对经验证据的要求似乎不再处于第一位了，这给了弦论研究者充足的理由来完全忽视这一要求，失去对这一要求的尊重，甚至抛弃科学方法的优良传统。而这种情况下的真正危险在于，如果这样的理论在多位聪明的理论物理学家的支持下随波逐流太久，物理学研究就可能会一直自我延续下去，哪怕它们已完全无法实现当初的承诺。

阿什特卡曾经希望基于他所提出的新变量而建立的对广义相对论的重新表述能填平引力方法和弦论方法两条路之间的鸿沟。斯莫林也曾认为有希望把超弦理论与圈量子引力理论统一起来，他甚至组织了一项计划来尝试做这件事（正是这种希望让他写了《通向量子引力的三条途径》这本书）。从1995年到2005年的10年时间里，斯莫林一直致力于发展一种背景无关的M理论，即圈量子理论的M理论扩展。但第二场超弦革命使得两种方法之间的鸿沟越发深了，而斯莫林这一举动显得两边不讨好，两个群体都对他的工作视而不见、充耳不闻。

这样的结果，无异于教会分裂。

彭罗斯曾设想让他的自旋网络成为一个框架，时空从其中自然演生。但在圈量子引力理论中，自旋网络的节点处产生的是空间体积的量子，节点之间的连接则表示空间体积量子相接处的面积量子，这在很大程度上是一个静态的图像。然而，理论物理学家必须找出一种方法为这样的时空框架引入某种动力学改变。这个问题被称为时间冻结难题（problem of frozen time）。

当然，关于时间的本质，哲学家已经思考了好几个世纪了。通过狭义相对论和广义相对论，爱因斯坦已经证明时间是相对的，而不是绝对的。爱因斯坦毫不犹豫地宣称：“对于我们当中相信物理学的人而言，过去、现在和未来之间的区别，只是一个顽固存在的幻影。”注

这样好倒是好，但不管某些哲学家、物理学家，以及少数深奥的数

学方程如何认为，我们关于时间流逝的体验是毋庸置疑的（在第16章我们还会回到这个话题），而时间在整个科学领域，以及物理学的大部分领域中都扮演着重要的角色，这也是毋庸置疑的。不管怎样，广义相对论只是一种把时空诠释为引力场的理论。

如果在一个理论中时间消失了，理论物理学家要怎么把它重新加进来呢？

关键技巧仍然是放下日常经验给我们带来的偏见，换个角度思考问题。受日常经验的限制，我们总认为空间和时间是个背景，我们物理世界中的事件在这个背景下发生。因此，想象一个不存在时间和空间的世界，需要一番艰难的抽象思考。

在我们的经验世界中，我们先看到这件事发生，再看到那件事发生。如果我们可以在这两件事之间建立起理性的、物理的联系，就很容易推断，是这件事导致了那件事。如果我们看到类似的事情一再发生，我们就会进一步推断这件事总是导致那件事。

量子理论从某种方面扰乱了这种简单的逻辑，但也不尽然。尽管爱因斯坦担心“上帝掷骰子”，但量子理论并没有完全削弱因果之间的联系。在经典的经验世界中，我们能够确定性地推断这件事导致了那件事，而在量子世界中，我们就得更谨慎一点儿。我们只能推断，这件事会以一个特定的量子概率导致那件事，而且可以通过描述“这件事”的波函数计算出该量子概率。这件事也可能以一个不同的量子概率导致另一件事，导致所有不同结果的概率加起来为100%。我们无法精确地知道到底会发生什么（是发生那件事还是另一件事），除非我们去观察它（即对它进行测量），使波函数坍缩，才会得到众多结果之一。不过，发生的结果总归还是这些预期中的结果之一，其中仍然是有一些确定性的。

那么，在一个没有时间的世界里，我们该怎么看待因果呢？我们可

能会认为，没有时间，肯定就没有因果了，因为没有时间一切都不可能发生了。但因果只是一种关系而已。而圈量子引力除了作为一种完全建立在关系之上的理论之外，还有什么含义呢？

自旋网络给出的图像是静态的。但如果我们在自旋网络的上面叠加另一个略微不同的网络，追踪节点与连接之间的关系，会怎样呢？在纸面上，二维的节点和连接如今就变成了三维的结构，其节点变为“边”，连接变为“面”。这些边“携带”了一个特定的空间体积，而面则“携带”了一个特定的面积。我们在这个网络上面继续叠加一个网络，再叠加一个，如此往复。

举个例子，假设我们有一个包含3个节点（3个体积量子）和6条连接（6个面积量子）的自旋网络，在它上面叠加一个有1个节点和3条连接的网络。绘制出这些节点与连接的演化轨迹，也就描述了不同的网络，即不同空间量子态之间的转变（如图21所示）。

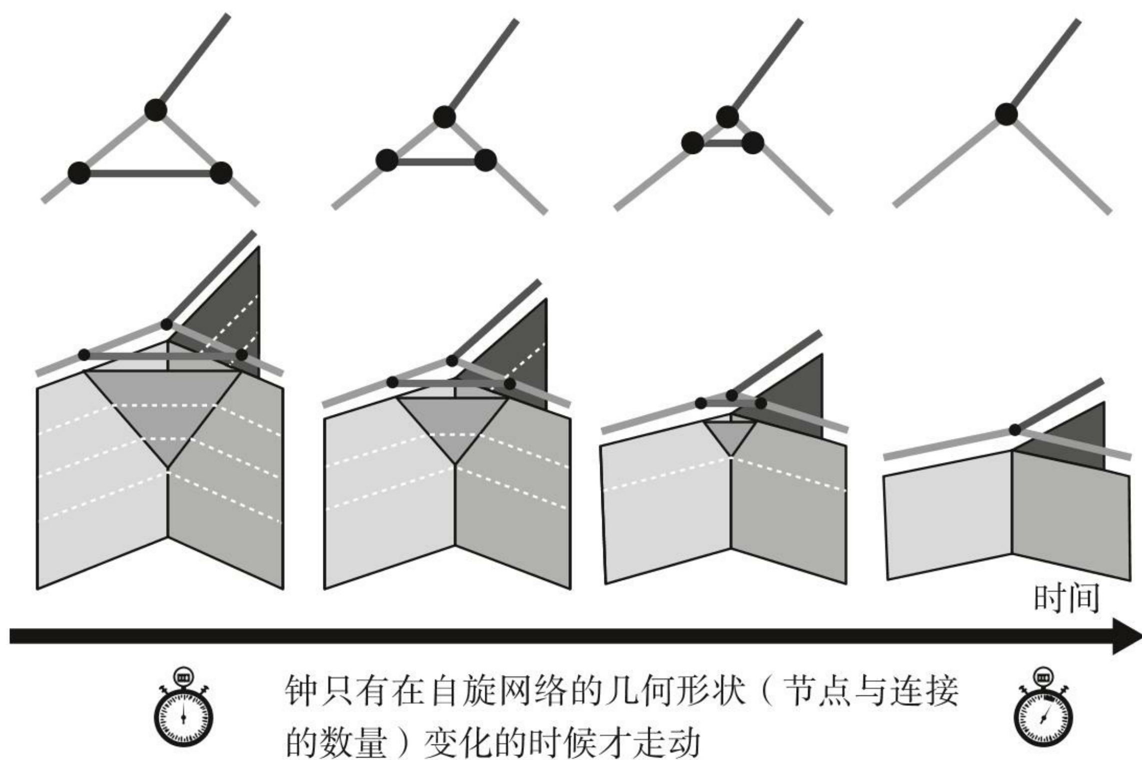


图21 在自旋泡沫中，自旋网络的节点变成线，连接变成平面。在这个例子中，一个

由3个体积量子（3个节点）和6个面积量子（6条连接）组成的自旋网络变成了一个由1个体积量子和3个面积量子组成的自旋网络。不过，这个演化过程并不是连续的。我们只关注节点和连接的数目，因此时钟只在这两个量发生变化的时候才走动

这样做的结果就是理论物理学所说的自旋泡沫（spinfoam）。为什么称它为“泡沫”呢？因为这并不是一个平滑而连续的过程，其本质是量子的。空间随机地演化，从一个组态跳跃到另一个组态。约翰·惠勒仅凭直觉想象了时空在普朗克尺度上的样子：“讽刺的是，在我后来对引力和广义相对论产生兴趣以后，我不得不发明‘量子泡沫’这个概念，这些泡沫由不断从虚无中产生又凭空消失的粒子组成，而时空本身则被搅成了一团扭曲的肥皂泡形状。”注

现在，二维的自旋网络图终于能表示三维的空间了。通过绘制节点与连接从一个网络到另一个网络的变化轨迹，即在不同时间点上的剖面图之间建立因果关系，我们实际上引入了第四个维度。我们可以称这个维度为时间。每个自旋泡沫都能追踪局部事件的历史，包括该处在空间量子态之间的转变。它们是怎么被画出来的不重要，重要的是以节点和连接的数（和值）表示出来的网络的几何形状。图21展示的转变并不是连续地发生的，第一张图和紧随其后的两张图本质上都相同，只和第四张图不同，而只有在形状发生实质改变的时候钟才会走动一下。这类转变发生得非常快，时间仅为普朗克时间量级（普朗克时间是光走过普朗克长度所需的时间，大约为5×10^{-44}秒）。

从1995年到2000年，一系列相关论文发表，自旋泡沫模型逐渐成形，其发展历史颇为复杂。除了罗韦利和斯莫林之外，还有多位理论物理学家参与了这项工作，包括约翰·W.巴雷特（John W.Barrett）、路易斯·克兰、约翰·贝兹（他提出了“自旋泡沫”一词，以致敬惠勒的想象）、劳伦特·弗赖德尔、岩崎淳一（Junichi Iwasaki，音译）、基里尔·克拉斯诺夫、福蒂妮·马科普洛（Fotini Markopoulou）和迈克尔·赖森贝格尔（Michael Reisenberger）。

这一模型或许能解释一些事情，但如果说它只是在用几张图来做游戏而已，除此之外没有什么意义，也并不过分。我们怎么能从这种图中准确地推断空间量子态究竟如何演化呢？我们需要从理查德·费曼于1948年提出的一种历史更久而我们又十分熟悉的量子力学方法中找答案。

费曼的方法植根于经典物理学中一些最简单的观察结果。为什么激光束发出的光总沿直线传播？因为从光源到目的地，走直线所需要的时间最短。这一原理首先由皮埃尔·德·费马（Pierre de Fermat，因费马大定理而知名）在1657年阐明。但光怎么能提前“知道”沿哪条路径传播花的时间最短呢？

费曼的回答是：光无须提前知道哪种路径花的时间最短，因为它走了从起点到终点的所有路径。

真的还是假的？我们可以想象在一个点光源和一张感光板之间放一张不透光的挡光板。如果我们在挡光板上挖一个小洞，那么到达感光板的光的强度（即振幅）只与通过小洞的光的振幅有关。如果我们在小洞旁边再挖一个小洞，为了计算到达感光板的光的强度，我们就需要将通过两个小洞的光的振幅相加。再挖第三个、第四个、第五个小洞，每次到达感光板的光的振幅都等于通过所有小洞的光的振幅相加。

等我们在挡光板上挖了无数个小洞，挡光板就被挖空了，不复存在。在这种情况下，我们就可以得出结论，到达感光板的光走了从光源到感光板的所有路径。

费曼将这条相对简单的物理学原理发展成另外一套描述非相对论量子力学的表述形式。他认为，一个量子粒子在从一个位置到另一个位置的过程中走了它所能走的所有路径，即该粒子运动的所有可能“历史”的综合。而在一个特定的位置发现该粒子的概率则由所有可能到达该点的路径的振幅总和决定。

在量子世界中，“选择一条路径”并不简单地意味着从A点移动到B点，路上可能发生任何奇怪的事情，比如虚粒子的产生和湮灭，这一点我在第4章中已经提到过。每种可能的路径或者我们所说的历史，都可以被描述为一张费曼图。对所有历史求和，就等价于对所有可能的费曼图求和。

当然，费曼图是画在一个假定的时空背景上的。但理论物理学家发现，类似的方法可以应用在圈量子引力上。每个自旋泡沫代表了一种可能的历史——网络的节点和连接之间一系列遵循因果关系的步骤，可以被视为量子引力中的费曼图。每个自旋泡沫都对应一个概率。为了知道空间量子态是如何演化的，我们必须计算出所有可能的自旋泡沫（所有可能的历史）的发生概率，并把它们相加。把所有不同的量子泡沫加起来，就会得到一个量子叠加态。我们把最终得到的这个大尺度结果叫作时空。

如今，关于自旋泡沫方法还有很多悬而未决的问题，如果你发现它并没有我刚刚描述的那么简单直接，你也不要太惊讶。从原理上说，自旋泡沫让我们能够通过自旋网络的演化来构想时空，但我们也不要对它寄予太多不切实际的期望：它仍然是一个研究活跃的领域。

对于有志于从相对论开始研究量子引力的理论物理学家来说，阿什特卡和斯莫林于1993年在美国宾夕法尼亚州立大学帮助建立的引力物理学与几何学中心仍然是一座重要的安全岛，矗立在越发波涛汹涌的弦论物理学海洋之中。它吸引了很多聪明的年轻物理学家走上这条相对冷门的量子引力之路。

福蒂妮·马科普洛就是其中之一。1997年，她在自旋网络的因果演化方面的研究吸引了斯莫林的注意力。马科普洛在希腊雅典长大，毕业于英国伦敦玛丽女王大学，然后在帝国理工学院跟随艾沙姆读博。斯莫林邀请她到宾夕法尼亚州立大学的研究组访问了几个月，她在那里完成了博士论文。次年，马科普洛在阿什特卡、斯莫林和普林的邀请下回到

宾夕法尼亚州立大学工作。

这个领域从来不缺特立独行的人，然而马科普洛的个性在其中仍属极端。她鄙弃弦论的原因是她觉得弦论“太男性化”，而她来到宾夕法尼亚州立大学可谓是在对的时候来到了对的地方。“一系列彼此不同的想法正在紧密合作，你会感觉到自己做研究的速度比隔壁屋的那个家伙更快，这在量子引力领域是很不寻常的。”她解释道。[注]然而，在帮助建立了一种能把时间的幻影重新带回圈量子引力理论中的数学技巧后，她自己却不接受这种基本假定。她坚持认为，时间应当是最基本的量，空间则是时间的流逝留下的一种印象。斯莫林一开始对这一想法很是抗拒，但随着思考的深入，他渐渐倾向于赞同马科普洛的看法——时间的本质和状态应当是他接下来几年的主要研究课题（我们在第16章还会回到这个话题）。

斯莫林与马科普洛的合作，以及他们共同的物理学观念，让他们之间的关系日益亲密。1999年，他们结了婚，并一同前往伦敦的帝国理工学院工作，两年后又回到美国。

2000年，超弦理论风头正劲，不仅吸引了大量关注，也吸引了大量资金。基普·索恩警告斯莫林，除了寻找引力波的相关工作之外，NSF不可能再挤出经费来支持其他方面的引力物理学研究了。[注]前途看起来一片渺茫。

霍华德·伯顿（Howard Burton）的到访让斯莫林和马科普洛感到非常意外，不过是意外之喜。此时，这位年轻的理论物理学家刚刚在加拿大安大略的滑铁卢大学获得博士学位，他不是来问斯莫林夫妇有没有博士后职位或者研究基金的，而是问他们是否有兴趣共同创建一个全新的理论物理研究所。

伯顿此前为了寻找报酬丰厚的职位，大胆地直接给一系列科技公司的CEO（首席执行官）写信，询问有没有工作机会。他的信吸引了黑莓

手机的制造商——动态研究公司的创始人和联合CEO迈克·拉扎里迪斯（Mike Lazaridis）的注意。拉扎里迪斯正好有一个空缺岗位：他正考虑建立一个新的理论物理学研究所，想让伯顿为他的计划调研一下。

吸引斯莫林和马科普洛的并不是伯顿不同寻常的故事（见第一面的时候，伯顿并未提到新研究所的出资者是谁），而是他提到新的研究所可能会得到大量的资金支持。在之后的一系列交谈中，伯顿提到，支持这个研究所的资金可能高达1亿美元。

在为拉扎里迪斯调研的过程中，伯顿与很多理论物理学家都聊过。在读博士的时候，他惊讶于量子引力研究领域“充满异议和社会学方面的障碍”。譬如说，超弦理论学家跟用其他方法解答同一个问题的人，从来不会产生什么有建设性的互动，反之亦然。(注)当晚晚餐时分，斯莫林与马科普洛对这个新的研究所表现出相当大的兴趣，之后还秘密地前往加拿大，与拉扎里迪斯讨论加入该所事宜。这个新研究所就是后来的圆周理论物理研究所。

当时的斯莫林也处在过渡时期。他刚刚结束了在宾夕法尼亚州立大学为期两年的无薪假期（他正是在这个假期去了伦敦的帝国理工学院访学，他在帝国理工学院享受教授待遇，薪水由一个私人基金会提供）。斯莫林和马科普洛都答应加入这个新研究所。于是，2001年，只有三名教员——斯莫林、马科普洛和加拿大弦论学家罗伯特·迈尔斯（Robert Myers）和四位博士后助理研究员的圆周理论物理研究所成立了。而这时，斯莫林与马科普洛已经友好分手了。

千禧年的来临似乎让每个人都开始思考改变人生的重大决定，(注)这一气氛也感染了罗韦利。1994年的一天，罗韦利在英国剑桥的艾萨克·牛顿数学科学研究所吃晚餐的时候，碰巧坐在了著名法国数学家阿兰·科纳（Alain Connes）的旁边。有了几杯酒的助兴，他们交谈得十分愉快，讨论了一系列数学和物理学问题。在讨论到某个话题时，科纳突然

坦言："关于时间是如何产生的，我有个想法，但没人认真对待我这个想法。"注

在经历了短暂的迷惑之后，罗韦利意识到，科纳的想法与自己之前一直在做的工作完全一致。他立刻飞奔上楼取回自己最近的论文。罗韦利与科纳在餐桌前聚精会神地思索着论文的内容，从多个角度展开讨论，运用了各种各样的数学技巧。科纳意识到，罗韦利的工作只是自己提出的方法的一个特例。那年晚些时候，他们俩合作发表了一篇论文。

事实证明，这是一次幸运的合作。与科纳的大名联系在一起，让法国几家机构开始向罗韦利敞开大门。就在合著论文发表的几个月后，罗韦利接到了一个电话，邀请他加入位于马赛九区的吕米尼的理论物理学中心，它坐落于地中海海岸。

1998—1999年，罗韦利担任马赛这个理论物理学中心的研究主任。2000年，他终于选择离开匹兹堡，来到这里接受教授的职位继续工作。10年的美国漂泊生涯让他得以继续追寻自己的科学事业，也为他带来了新的同事（他们的友好关系将持续终生）和极好的机会。对于离开美国，他有诸多不舍，但对于这一次的决定，他比上一次更为坚定。

阿什特卡、罗韦利和斯莫林再次天各一方，不过他们合作的决心从未因此有所减弱。他们已经并肩走了很长的一段路，也完全应当为自己取得的成就而自豪，不过要做的事情还有很多。几年后，彭罗斯如此描述他对圈量子引力的看法：

> 我会毫不犹豫地说，这些进展是自半个多世纪前狄拉克等人开创量子引力正则化方法以来该领域最重要的进展。圈态确实阐释了广义协变性提出的深刻问题中的至少一部分。不仅如此，这些进展似乎还将讨论引入了一个令人着迷且出人意料的方向，时空结构开始展现出一些喜人的离散性元素。注

在斯莫林首次出版于2000年的大众书籍《通向量子引力的三条途径》中，他表现得更为乐观。他提出，我们“到2010年，最多2015年就能得到量子引力理论的基本框架了”，[注]还预言到21世纪末的时候，量子引力理论会被写入高中课本。

虽然量子引力领域确实有了不少进展，但进入新千年以来的事实表明，要做的工作还有很多。或许最重要的问题在于，圈量子引力应当是一个引力理论，而引力表现为物质对象之间的一种力。

我们需要往这个新理论中加入一些物质实体了。

---

1. Carlo Rovelli and Lee Smolin,‘Discreteness of Area and Volume in Quantum Gravity’,Nuclear Physics B,442 (1995),593–619; arXiv:gr-qc/9411005v1,2 November 1994.The quote appears on p.5 of the archived paper.
2. See,for example,Helge Kragh,Higher Speculations: Grand Theories and Failed Revolutions in Physics and Cosmology,Oxford University Press,Oxford,2011,pp.300–1.
3. “大而不能倒”是一个经济学领域的概念，指一些规模极大的企业一旦倒闭，可能会掀起巨大连锁反应，给社会造成更严重的伤害，因此在它们濒临破产时，政府应当出手相救。——译者注
4. Steven Weinberg expressed this sentiment to me as follows: ‘String theory still looks promising enough to be worth further effort.I wouldn’t say this if there were a more promising alternative available,but there isn’t.We are in the position of a gambler who is warned not to get into a poker game because it appears to be crooked; he explains that he has no choice,because it is the only game in town.’Personal communication,13 January 2013.
5. Michael Duff,quoted by Lisa Randall,Knocking on Heaven’s Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World,Random House,London,2011.p.304.
6. In The Trouble with Physics: The Rise of String Theory,the Fall of a Science,and What Comes Next,published by Penguin Books,London,in 2008,Smolin wrote: ‘Nearly every particle theorist with a permanent position at the prestigious Institute for Advanced Study,including the director,is a string theorist; the exception is a person hired decades ago.The same is true of the Kavli Institute for Theoretical Physics.Eight of the nine MacArthur Fellowships awarded to particle physicists since the beginning of the program in 1981 have also gone to string theorists.And in the country’s top physics departments(Berkeley,Caltech,Harvard,MIT,Princeton

and Stanford),twenty out of twenty-two tenured professors in particle physics who received PhDs after 1981 made their reputation in string theory or related approaches.' This quote appears in the Introduction,p.xx.

7. Lee Smolin,personal communication,7 September 2017.

8. Sheldon L.Glashow,with Ben Bova,Interactions: A Journey through the Mind of a Particle Physicist and the Matter of This World,Warner Books,New York,1988,p.334.

9. 斯莫林一直不理解这个观点到底是什么意思，他认为圈量子引力理论完全能适应粒子物理标准模型所需要的量子场结构，如果有需要，它还能与希格斯场，甚至超对称相结合。（注：Lee Smolin,personal communication,7 September 2017.）罗韦利对这一观点的反驳则是："我们并没有接近物理学的尽头。我们最好也不要幻想存在一个终极的万物理论来解决一切问题，还是一次只解决一个问题吧。"（注：Carlo Rovelli,'Loop Quantum Gravity: The First 25 Years',Classical and Quantum Gravity,28 (2011),153002; arXiv:gr-qc/1012.4707v5,28 January 2012.）

10. Joseph Conlon,Why String Theory?,CRC Press,Boca Raton,FL,2016,p.226.

11. Lee Smolin,The Trouble with Physics: The Rise of String Theory,the Fall of a Science,and What Comes Next,Penguin Books,London,2008,p.284.

12. 我最喜欢的来自加拿大哲学家、20世纪60年代媒体理论学家马歇尔·麦克卢汉（Marshall McLuhan）的名言是："我可能犯错，但我从不怀疑自己。"要了解更多麦克卢汉主义的内容，可以参阅网页：https://marshallmcluhan.com/mcluhanisms/ 。

13. 我必须指出，这只是对于客观现象的总结，本身并没有批评的意思。各行各业的许多人都会表现出这种倾向，圈量子引力圈子里的一些成员也会表现出这些特征。

14. Glashow,Interactions,pp.330 and 335.

15. David Gross,quoted by Carlo Rovelli,personal communication,21 June 2017.

16. 威滕名"爱德华"（Edward），"埃德"（Ed ）是他的昵称。——译者注

17. Conlon,Why String Theory?,p.151.

18. Smolin,The Trouble with Physics,p.275.

19. Albert Einstein,letter to the Besso family,21 March 1955,quoted in Alice Calaprice (ed.),The Ultimate Quotable Einstein,Princeton University Press,Princeton,NJ,2011,p.113.This was a letter of condolence on the passing of his good friend Michele Besso,written less than a month before his own death.

20. John Archibald Wheeler,with Kenneth Ford,Geons,Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics,W.W.Norton,New York,1998,pp.148–9.

21. Fotini Markopoulou,quoted by Sally Davies,'This Physics Pioneer Walked Away from it All',Nautilus,28 July 2016.Available at http://nautil.us/issue/38/noise/this-physics-pioneer-

walked-away-fromit-all.

22. Lee Smolin,personal communication,7 September 2017.

23. Howard Burton,First Principles: The Crazy Business of Doing Serious Science,Key Porter Books,Toronto,2009,p.32.

24. 我在这里采用大多数人的纪年方法，将1999年12月31　日视为上一个千禧年的最后一天。那一天对我自己来说也有重要意义：我决定从公司辞职，建立自己的事业。这一决定背后有很多理由，但其中之一是为了有更多的时间写与科学相关的文章和书籍。

25. Alain Connes,quoted by Carlo Rovelli,What is Time? What is Space?,manuscript translated by J.C.van den Berg,p.34.Published by de Renzo Editore,Rome,2006.

26. Roger Penrose,The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe,Vintage,London,2005,p.953.

27. Lee Smolin,Three Roads to Quantum Gravity: A New Understanding of Space,Time and the Universe,Phoenix,London,2001,p.211.

第三部分 细化

第11章 引力子、全息物理学，以及为什么物体会下落

世界是由什么组成的？这可能是相对论研究者和弦论研究者可以达成一致的不多的事情之一。如果“世界”意味着一切事物，那答案毫无疑问：世界是由量子场组成的。

当然，量子场论也不能解释字面上的“一切事物”。我们不会用量子场论去解释人类演化、意识、国内政治，因此，似乎需要对“一切”做出一个界定。当我们说“一切事物”时，我们指的实际上是物理现实（空间、时间、物质和能量）的结构，它们都可以被还原成一系列量子场及其相互作用。粒子物理标准模型描绘了时空背景下基本粒子的性质和行为，以及它们之间的相互作用力，而圈量子引力理论坚持认为，时空本身的性质和行为需要用另一种背景无关的量子场来描述——时空就从这样的量子场中演生出来。

改述一下哲学家威廉·詹姆斯（William James）——也有可能是伯特兰·罗素，随你选谁——描述的那位老妇人所说的话，我们可以说：世界是量子场论驮着量子场论形成的啊。注

虽然还有待完善，但圈量子引力理论的基本逻辑与数学框架在20世纪90年代中晚期就已经大体成形了。多位理论物理学家做了大量工作，以确定、求解、优化并扩展该理论的数学基础及主要结论，发展出了自旋网络、体积与面积量子，以及基于自旋泡沫演生出的时空，等等。在这些人之中，尤其值得一提的是年轻的德国理论物理学家托马斯·蒂曼，他于德国亚琛的理论物理学研究所起步，然后在宾夕法尼亚州立大学与阿什特卡共事，后来又去了哈佛。

阿贝·阿什特卡、卡洛·罗韦利和李·斯莫林在实际活动和地理意义上

的分开是在2000年，但早在5年之前，他们在研究思路上就已经分道扬镳了。他们仍然在合作，但他们的研究兴趣走向了不同的方向。大约从1995年起，关于圈量子引力可能的发展方向，斯莫林和罗韦利产生了不同的想法。阿什特卡及其合作者（包括蒂曼和莱万多夫斯基）勤奋地给圈量子引力发展出更精确的数学表述，并为之奠定了极为重要的结构性基础。20世纪90年代末，阿什特卡的研究重心转向了与宇宙学和黑洞物理学有关的广义相对论方面。

斯莫林对于向整个现代理论物理学界普及圈量子引力理论十分积极，他通过将其与其他场论结构（尤其是弦论）联系起来，把它变得更主流。虽然圈量子引力理论与弦论之间有诸多不同，但斯莫林感受到，通往量子引力的这两条途径之间的相同点很多，就算很多理论物理学家不愿意承认也是如此。这意味着，这两种理论间可能存在更深的联系。要找到这些联系，需要极广阔的视角和综合性思考，而斯莫林在这方面的思路深受路易斯·克兰影响。

1995年，斯莫林走出停滞期，在《数学物理学杂志》（*Journal of Mathematical Physics*）上发表了一篇论文。他自己将其称为“连接性”论文，并认为“这是我眼中自己独立为圈量子引力做出的最大的贡献……我深以这篇论文为傲，觉得它是超前于时代的……确实，其中的一些结果……最近又被重新发现了”。(注)

罗韦利则相信圈量子引力理论已经是一个一致的、独立自足的结构了。他很想为这个新理论做一些收尾工作，也就是说，通过使用从量子场论那里借来的方法预言一些可被实验检验的新物理现象，这或许能为空间与时间本质之争盖棺论定。在2011年于波兰扎科帕内为研究生做的一系列入门性讲座上，罗韦利认为，对于圈量子引力理论：

必须根据两个标准来判断。其一是它能否提供一个一致的体系，符合我们已知的自然规律，即量子力学，以及在近似极限下符合经典的广

义相对论。其二是它能否预言新的物理现象，并与未来的经验观测相一致。这就是我们对量子引力理论的所有要求。(注)

当然，他们三人的观点并非不相容，但他们的努力方向和研究重点不一样。随着新世纪的来临，斯莫林和罗韦利走上了不同的道路。罗韦利偶尔会从量子引力研究中抽身出来研究量子力学的诠释问题（见第13章），但他主要的兴趣还是在将圈量子引力理论变成一个被广泛接受的基础物理学理论方面。他想完成这个自己亲手帮助建立的理论。

我们在第6章中提到，还存在一种通往量子引力的协变理论，它是从平直背景时空中的引力子场出发的。引力子场被认为是广义相对论中与引力相关的时空弯曲的起源。

但由于圈量子引力理论中完全不存在背景时空，这个理论并没有将引力子作为基本组成部分，因而引力子在该理论中的存在并不明显。或许是粒子物理学家不可避免地偏好量子场论会推出粒子的想法，他们坚持认为，如果圈量子引力理论真的是一种量子场论，它就需要拥有场量子化后得到的粒子。这些粒子在哪儿？我们必须找出答案。

还有一个与之相关的问题，它涉及圈量子引力理论与广义相对论，以及最终与经典牛顿力学对引力的理解的相容性。在经典牛顿力学中，引力与距离成平方反比，而且看起来像是一种超距作用。爱因斯坦之所以如此有声望，就是因为他提出了一致性原理。他的广义相对论在极限（近似）情况下，即时空近似平直、速度远低于光速的情况下，可以回到牛顿的平方反比定律。

那么，在低能量的近似情况下，圈量子引力理论会回到广义相对论吗？它毕竟是个引力理论。从面积与体积量子，以及自旋泡沫网络之间的转变出发，我们能否沿着逻辑一直追溯到我们人类的经典直觉性疑问：为什么物体会落下呢？这在原理上应当能够实现。

我在第4章解释过，粒子物理标准模型让我们将物质粒子（如夸克和电子）之间的力理解为被力粒子“传递”（见第4章中的图10）。正电荷与负电荷间的电磁力由光子传递。电磁力是一种长程力，由无质量的力粒子——光子传递，光子即电磁场的场量子。

W玻色子和Z玻色子传递了不同味的夸克和轻子（如电子和中微子）之间的弱力。弱力是短程力，它只在原子核内部起作用，由较重的力粒子来传递，我们可以把它们看作“重光子”。它们是“弱力场”（通常被称为弱相互作用）的场量子。带有不同色的夸克（如红色和蓝色）之间的强色力则由胶子传递。虽然我们知道色力也是短程力，但色力的作用机制与弱力不同，胶子和光子一样是无质量的，它们是色场的场量子。

通过以上这些描述，你大概已经有一些基本概念了。

在这种理解的背景下，引力这种“力”必须由某种粒子（即引力场的场量子）来传递的想法，似乎就很难以抗拒了。如果如很多理论物理学家坚持认为的那样，引力也是一种量子现象，那么引力子必然存在。我们知道引力是一种长程力，这就意味着引力的传递者是无质量的。根据物理学家的推算，引力的性质表明引力子应该是一种“张量玻色子”，其自旋为2。[注]

在费曼图中，传递力的粒子会以虚粒子的形式在受这种力作用的物质粒子（如夸克和轻子）间穿梭，如第4章图8所示，其中虚粒子用一条波浪线表示。从逻辑上将这一图像拓展到引力问题上，就应该有一种虚引力子（用一条波浪线表示），在物质粒子之间穿梭。

虽然这样的说法看起来很有说服力，但它不是圈量子引力理论得出的结论。从这种量子引力的数学形式中演生出来的基本量子并不是引力子。我们在前文中已经提到，圈量子引力的基本量子是面积与体积量子。

这两种角度大相径庭，很难协调一致。粒子物理学家认为所有尝试描绘引力的量子理论都应该包含引力子，然而广义相对论从根本上就没有把引力看成一种力，只是将其视为时空形状（引力场）扭曲衍生的二级产物。当然，这并不意味着引力场的变化不会产生物理效应，它们当然会产生物理效应，正如罗韦利解释的那样：

> 如果太阳突然消失不见，局部的时空形状扰动会（以光速）在8分钟之后传播至地球，我们就会感受到这一变化。同时，就在这8分钟之后，电磁场的扰动也到达了地球，我们会看到太阳消失了。第二种效应是由电磁场传递的，第一种效应是由时空传递的。[注]

从相对论的道路发展的量子引力理论并不认为引力子是量子场的基本激发或振动产生的场量子，这一点或许并不令人奇怪。在正则量子引力理论中，本来就不存在需要传递的力。但这并不意味着圈量子引力理论中不存在引力子。

20世纪20年代是量子力学发展初期，我们从那段历史学到的很重要的一点就是，自然有一种本质上的二象性。我们发现，一些原本只能用波的形式描述的现象（如光）也可以用粒子的形式来描述，而原本只能用粒子（如电子）的形式来描述的现象也可以用波的形式来描述。在这些物理学描述发展至成熟的过程中，我们用“场”的概念取代了“波”，并将“粒子”看成场的基本激发或振动，而不是独立的小块物质存在。

但大自然的这种本质上的二象性并不局限于基本粒子及其对应的量子场。原子尺度上的任何现象，原则上都既可以被描述为携带着能量的波，也可以被描述为对应的粒子。打个比方：一道携带着能量E的波可以被看成带有一个特定的质量m，其中$m=E/c^2$。“波的质量”并不具有太大的物理意义，我们只是将质量看作一种粒子般的性质而已。[注]

我们无须将宏观的波现象（如海洋中的水波）与粒子联系起来。但当我们研究微观尺度的原子和亚微观尺度的粒子时，波现象的粒子性

（以及粒子现象的波动性）就变得越来越重要，原因很简单：在这样的尺度上，普朗克常数h虽然仍很小，但已不能再忽略了。㊟

一些固体和液体由原子在三维空间内以规律的方式排成阵列或晶格而形成。这些原子在晶格中并非完全固定不动，而是有一些“扭动”的空间。一个原子发生些微的移动都会影响它邻近的原子，并将这种移动沿着晶格传播出去，结果就造成所有的原子发生了集体振动，我们可以将其描述为波。这类振动可能会有一系列频率，但都可以分解为一系列基础频率的叠加，这些基础频率体现了该物质的驻波（简正模）特征。

我们可以将这些振动描述为沿着晶格传播的波。但这些波来源于微观现象，因而普朗克常数h不可忽略，而根据量子力学，我们可以选择将这类波当成粒子来看待。1932年，苏联物理学家伊戈尔·塔姆（Igor Tamm）用“声子”（phonon）一词来描述晶格振动对应的粒子。他之所以选择这个名字，是因为这类振动的一部分频率是人耳可以听到的（也就是说，它们属于声波）。声子有时也被称为“准粒子”（quasiparticle），它们并非基本粒子，也不像光子、W玻色子、Z玻色子以及胶子那样传递着一种力。

回到引力问题上来。2015年，LIGO探测到了引力波，这是一项非凡的成就，但许多熟悉广义相对论及黑洞性质的物理学家对此并不惊讶。他们本就认为，只要仪器灵敏度足够高，就能探测到引力波。换句话说，探测到引力波只是个时间问题。

在量子力学中，我们可以将波看成粒子，那么与引力波相关的粒子自然就是引力子。

而这样做又会怎样呢？圈量子引力理论预言空间会被量子化成离散的小体积，它们坐落在自旋网络的节点上。在自旋泡沫中，自旋网络从一个态跃迁（“跳”）到另一个态上，而由自旋泡沫演生出来的时空自然而然地拥有了一种格点结构，由空间的离散量子本质所决定。

这与QCD中我们人为加入以简化复杂计算的虚拟格点完全不同。一方面，圈量子引力中自然演生出来的格点是动态的，而QCD中的虚拟格点是静态的。因此，我们可以将引力波看成一种沿着时空格传播的集体振动。从这个角度看，引力子就相当于与时空集体振动相关的准粒子，正如某些固体或液体中原子的集体振动产生的准粒子（声子）一样。

现在我们可以把整个逻辑填补完整了。如果太阳消失，局部引力场产生的扰动会在8分钟之后以引力波的形式传到地球，我们可以将这种波视作无质量的引力子，它们以光速运动。

我们在前文看到，超弦理论预言引力子有一种“闭合弦”的性质。阿什特卡、罗韦利和斯莫林早在1991年就已经推导出，在圈量子引力理论中，引力子是与引力波有关的准粒子。“我们很早就知道，圈量子引力中包含了引力子。”斯莫林说。[注]在此基础上，引力子存在的可能性很大。不仅如此，鉴于我们所处的时空中到处都有产生引力的物体，引力子的存在应该相当普遍。既然如此，为什么我们从来没有见到过它呢？

也许我们不应该得意忘形。英国物理学家弗里曼·戴森[注]（Freeman Dyson）发表在《纽约书评》上的对布赖恩·格林的《宇宙的结构》（*The Fabric of the Cosmos*）的评论中提了一个很有趣的问题：从原理上讲，引力子究竟是不是可观测的？他写道：

> 由于引力相互作用极其微弱，任何探测引力子的探测器（假设存在的话）都必须极为巨大。如果探测器的密度等同于普通材料的密度，这台探测器的大部分区域离引力子的产生源就太远了，因而无法探测到引力子。而如果我们把探测器压缩到极高的密度以探测周边的引力子，探测器就会坍缩成一个黑洞。这似乎是大自然的一个阴谋，让引力子探测器无论怎样都无法工作。[注]

这不是这个问题第一次被提起。戴森本人早些时候提到过，斯莫林在20世纪80年代初也发表了两篇论文，认为引力子是无法被探测到的。

两年后，普林斯顿大学的托尼·罗思曼（Tony Rothman）和史蒂文·鲍恩（Steven Boughn）详细地探讨了戴森提出的问题的可能解答。他们的结论是，根据假想中的引力子的物理学特征，没有任何一项因素一定会阻止我们探测到它。但要想探测到引力子，探测器必须有木星那么大，围绕着一颗白矮星或中子星工作，还要以不切实际的100%的效率运行。

更不切实际的要求还在后面。为了防止探测器被中微子干扰，仪器周围要包上一层屏蔽材料，其厚度需要达到数光年。这样的屏蔽层会迅速坍缩成黑洞。可以想象，任何建造这类仪器的计划书都会被地球上的经费审批部门（或是提供经费的纳税人）无情地拒绝。

罗思曼和鲍恩的回答显然是否定的："我们可以有把握地说，我们宇宙中的任何一个人都不可能探测到（一个单独的引力子）。"㊟

从逻辑上推论，如果我们探测到引力波，就意味着探测到了大量引力子，因此也就能从中推断出一些引力子的性质。但如今实际情况不允许我们探测到单个引力子则意味着，这种与引力场相关的粒子仍然是假想中的。

这些研究回答了引力子的问题，但带出了另一个问题：在圈量子引力理论中，我们要如何为粒子与它们之间的相互作用建立模型呢？我们可以以引力子为例来研究，但它应该适用于标准模型中所有的粒子（如电子），因为我们希望描述这些粒子的理论是不依赖于时空背景的。

在某种程度上，我们可以假设圈量子引力描述的时空的量子本质只在普朗克尺度才显现出来，而标准模型所描述的物理学比普朗克尺度还高17个数量级。那么，就标准模型的尺度而言，时空是否可以理所当然地被看作形成了一个连续的背景呢？

但仅仅是这样还不够。如果我们相信圈量子引力告诉了我们普朗克尺度的空间和时间的结构，那么理论物理学家需要解释我们更熟悉的粒

子物理学是如何从这样的结构中演生出来的。罗韦利在2011年提出了这样的观点：“无法用于计算的理论不是好理论。”[注]他接着解释道，量子引力理论几乎无法用来计算任何东西，这“简直就像神话一样”。

要跟上理论物理学家尝试从圈量子引力理论还原出物理学定律的探索之旅，我们首先需要对费曼发展的量子场论数学形式有更深的了解，并更加熟悉其中的一些术语。在于1985年首次出版的《量子电动力学：光和物质的奇妙理论》（*QED: The Strange Theory of Light and Matter*）一书中，费曼指出，要理解与光（光子）和电子相关的多种现象，只需要理解以下三种基本行为即可：

1. 光子在不同位置之间的移动；

2. 电子在不同位置之间的移动；

3. 电子发射或吸收光子。[注]

这就够了。我们可以用一个简单的费曼图来描述这三种行为。如果你觉得这一切简单得令人难以置信，或者说好到不像是真的，那么你的怀疑是对的。在这张简单的费曼图背后，有一系列复杂的数学计算，它们共同形成了这个光子和这个电子的运动方程。根据这些方程，我们能算出每个行为的传播函数（propagator），它决定了电子从这里到那里（用一条直线表示）和光子从别的某个位置到那里（用波浪线表示）的概率，即概率振幅的平方。我们还需要很多数学计算来得出电子与光子“相遇”并吸收或放出光子的顶点处的作用（或称耦合）强度。至于建立方程组并进行计算，有一系列非常具体的规则，被称为费曼规则。

让我再详细地解释一下。为了简化问题，我们假设电子和光子只沿一个方向运动，即x方向。因此，电子从这里（t_1时刻的x_1位置）移动到那里（t_2时刻的x_2位置），传播函数就包含了告诉我们电子从x_1t_1移动到x_2t_2的过程所需要的所有信息。

现在，你可能开始意识到问题的本质所在了。在圈量子引力理论中，不存在“这里”和“那里”，不存在“从这个位置到那个位置”，圈量子引力理论中根本不存在沿着x轴方向摆放的可以测量距离的尺子——实际上，连“x轴方向”都没有，也没有钟可以告诉我们从这个位置到那个位置要用多长时间。费曼图的轴有意标上了“空间”和“时间”，因为这一方法假设时空作为背景而存在。

不仅粒子物理学家已经习惯了费曼图方法，实验物理学家同样如此，因此我们无法弃之不顾。我们必须把这样一个建立在背景时空基础上的理论框架与时空本身演生而成的理论统一起来。圈量子引力研究者只得研究如何在没有背景时空的情况下做粒子物理学计算，就像马戏团的杂技演员在没有安全网的情况下表演杂技一样。

在这本科普书中，我或许可以凭空挥挥手，泛泛而谈时间和空间，但要做费曼图这类的实际计算，光挥挥手就不行了，我们得做点儿更具体的事情。最重要的是，我们需要承认我们描述的物理学现象发生在一个有限的空间体积和一个有限的时间段里，也就是说，我们在时空中划出了一块小区域，所有我们感兴趣的现象都发生于其中，在这之外的现象我们一概不管。

当我们在量子场论中做这件事时，我们发现为了得出正确的运动方程，需要在作用量的表达式中加入一个“边界项”。

在我继续解释这个边界项的作用之前，我们先来回顾一些借助高中几何学知识来理解的琐碎发现。欧几里得几何告诉我们，圆是一种二维图形，其面积$A=\pi r^2$，其中r是它的半径。“二维”的性质体现在面积上，它的单位是平方厘米这种面积单位（一个半径为5厘米的圆的面积约为78.5平方厘米）。但边界是一维的——圆的周长是一条线，由周长等于$2\pi r$得出，一个半径为5厘米的圆的周长约为31.4厘米。

类似地，立方体是三维物体，反映在其体积上，体积是立方体边

长l的三次方。一个边长l为5厘米的立方体，其体积为125立方厘米。但立方体的边界是二维的：它由6个面积相等的正方形组成，其总面积为$6l^2$=150平方厘米。大体来讲（也很明显），任何一个区域的边界的维数都比它所包围的区域的维数少1。

我们要知道的第二件事是，边界项表达式已经包含了我们需要计算的一切信息。在圆的例子中，如果我们知道了周长，我们就可以将它除以2π来得到半径，也可以说圆的周长等于$\sqrt{4\pi A}$。这就是说，圆的面积已经被编码在边界周长的表达式中了。同样，立方体的表面积为$6\sqrt[3]{V^2}$：立方体的体积也已经编码于其边界面积的表达式之中了。

这当然只是基本几何学中最简单的例子，当包围区域的形状更复杂的时候，问题也会变得更为棘手，但通过以上两个例子，你应该已经明白其基本思想了。

因此，在量子场论中，要加入作用量方程中的边界项必须比它所包围的区域少一个维度。它还编码了关于这个区域内部物理学过程的信息。如果我们可以确定系统的初始条件，我们就拥有计算经典解所需的所有信息了。

斯莫林在1995年的“连接性”论文中给圈量子引力引入了一个有限的边界，但他没能将其发展成一种可以用来进行计算的数学表达。2003年，罗韦利在马赛理论物理学中心的同事罗伯特·厄克尔（Robert Oeckl）找出了量子场论“一般边界”表述的原理。

对于量子场论而言，边界条件对于内部情况的“编码”要比我刚刚举的简单几何例子复杂得多。厄克尔将这种方法与全息术联系在了一起，他写道：“从这种意义上说，这种数学表述类似于‘全息的’，也就是说，它内部的信息已经完全被边界上的态所编码了。”[注]这个比喻很妙。在全息术中，重建三维图像所需要的所有信息都被编码在一幅记录在光刻胶或者光聚合物上的二维干涉图中。

关于如何用圈量子引力理论进行计算的问题，厄克尔与罗韦利讨论过很多次。罗韦利还能生动地回忆起某一次对话的场景，这次对话给他带来了灵感的闪光，他形容为“仿佛电灯泡被点亮的瞬间”。

边界上所编码的信息体现了内部区域的量子力学过程的所有不同的历史。比方说，如果我们关心的过程是电子从一个地方移动到另一个地方，那么这件事发生的时空区域的边界上所编码的信息就包含电子经历的所有可能的过程，包括虚粒子产生和湮灭的各种历史。如果我们选择一个足够大的区域，并设定好初始条件，边界上的物理学的表现就趋向于经典的轨迹，这是内部所有不同量子通道发生相长干涉的结果。

上面的讨论都是关于一块时空区域周围的边界进行的，但这一数学结构并不依赖于时空背景。它对自旋泡沫区域的边界同样适用。

这一进展让罗韦利激动不已。在接下来的几年里，他和来自多个机构的多位同事（包括罗马、都灵、比萨的大学，宾夕法尼亚州立大学，以及圆周理论物理研究所）合作，将这些技巧用在自旋泡沫描述上。

自旋泡沫的数学形式并不描述粒子的产生和湮灭，取而代之的是空间量子的产生和湮灭。只要选择一个合适的大尺度区域（包含许多个空间量子及自旋网络之间的多次跃迁），边界上编码的“全息物理学”就趋近于一个极限，亦即连续时空中的物理学结果。

有了边界方法，理论物理学家就能计算粒子的行为，且无须借助背景时空假设。粒子在时空中从一个位置移动到另一个位置的结果，自然地出现在了关于边界本身的方程中。“我们能实现这件事真是太惊人了。”罗韦利说。注厄克尔帮助圈量子引力理论研究者搬走了一直以来挡在路中间的巨大障碍。

这个数学技巧确实十分高明，但理论物理学家想要知道它能否真正用来导出一套正确的对物理学的描述。理论物理学家还没有把物质引入

这一图像之中——到此为止这还是一个关于空间和时间本身的理论，但我们已经看到，无质量的粒子并没有被排除在外。圈量子引力研究者的下一步，就是描述引力子的物理规律。

推导出引力子的传播函数当然没有问题，不就是描述引力子怎样从这里移动到那里嘛。但不管怎么样，引力子只是一种假想中的粒子。前文提到过，在我们的宇宙里，探测到引力子的可能性是微乎其微的。这种情况下，理论物理学家怎么知道他们得出的对引力子的描述是否正确呢？

我们知道，量子引力的协变方法在重正化方面遇到了很大的困难，但在低能近似下，会让方程失效的发散项是可以被忽略的。这就意味着，我们可以基于粒子物理学家偏爱的“传统”方法，为引力子的传播函数推导出一个近似的、低能的表达。罗韦利与同事证明，把他们的边界方法用在自旋泡沫数学形式上，计算出的引力子传播函数与协变量子引力低能近似下推导出的结果完全一致。

这表明，两种不同的理论方法（不管它们各自对物理学实在的描述是否正确）产生的结果至少是一致的。在大距离极限上，圈量子引力理论计算出的引力子传播函数与“这里”和“那里”的距离成平方反比，也依赖于如牛顿引力常量G这样的物理学常数，这与经典极限下的结果完全一致。

虽然理论物理学家为圈量子引力建立了逻辑上的联系，但这种从面积与体积量子出发的时空结构与人们关于为什么物体会下落的经典直觉之间的联系并不那么明显。这一问题涉及比较这种行为的本质。在量子力学中，理论上我们可以把量子行为外推至量子数目很大的极限上，这样就得到了经典物理学。这一原理被称为对应原理（correspondence principle）。不幸的是，在圈量子引力理论与广义相对论，以及最终与牛顿的万有引力定律之间建立对应，就不仅仅是把空间量子外推到大数量极限那么简单了。引力子传播函数的数学推导很复杂，依赖于很多假

设，也存在许多悬而未决的疑问。

然而，罗韦利有勇气（至少在私下）宣称："我们已经从一个没有空间、没有时间的世界出发，推导出了牛顿定律。"[注]

费曼此前对弦论圈子的批评广为人知，他不喜欢弦论正是因为他认为弦论研究者完全没有计算出任何东西。[注]而圈量子引力研究者能用他们的边界方法进行一些有物理意义的计算，这无疑是他们真正的成就：

> 在我看来，计算的意义……（在于）它展示出从背景无关的抽象形式体系中，一些低能量的、有清晰物理意义的量是可以被计算出来的。[注]

引力子也许永远都无法被观测到，但这无关紧要。理论物理学家已经证明，理论上来说，没了这张由背景时空组成的安全网，我们也能进行粒子物理学计算。

在这个过程中，理论物理学家还有一些新的发现。他们发现由巴雷特和克兰发展的原始的自旋泡沫模型需要修正，因而引入了一个新的参数，被称为伊米尔齐参数或巴韦罗-伊米尔齐参数，通常用γ表示，以意大利理论物理学家乔治·伊米尔齐（George Immirzi）和西班牙理论物理学家费尔南多·巴韦罗（Fernando Barbero）的名字命名。在第15章中讨论黑洞的熵的时候，我们会再次遇到这一参数，因此这里不再过多讨论。该参数修正了对面积谱的表达，也因此在某种程度上改变了面积量子的大小。[注]简单来说，它的出现在某种程度上是个谜，也表明圈量子引力理论在一些很重要的方面还没有完全被人理解。

但不管怎样，理论物理学家已经表明，用一个不依赖背景时空的理论来进行粒子物理学计算是可行的。下一步就是思考关于物质的问题了。

1. The (probably apocryphal) story goes that,following a lecture on astronomy or cosmology,a little old lady sitting at the back raised her hand and declared that this was all rubbish.Everyone knew that the world was a flat plate sitting on the back of a giant turtle (in Hindu mythology,the world is supported by an elephant,which is in turn supported by a tortoise).With an air of smug superiority,the lecturer asked if she knew what supported the turtle.‘You’re very clever,young man,very clever,’ she replied.‘But it’s turtles all the way down’.Various sources attribute different speakers.For example,in A Brief History of Time,Stephen Hawking suggests that it was the philosopher Bertrand Russell (see page 1).In Geons,Black Holes and Quantum Foam,John Wheeler suggests it was the philosopher William James (see page 349).
2. Lee Smolin,‘My Divergence’,personal communication,21 July 2017.The ‘linking’ paper is Lee Smolin,‘Linking Topological Quantum Field Theory and Nonperturbative Quantum Gravity’,Journal of Mathematical Physics,36 (1995),6417; arXiv:gr-qc/9505082v2,30 January 1996.
3. Carlo Rovelli,‘Zakopane Lectures on Loop Gravity’,in John Barrett et al. (eds),Proceedings,3rd Quantum Geometry and Quantum Gravity School:Zakopane,Poland,February 28–March 13,2011; arXiv:gr-qc/1102.3660v5,3 August 2011,p.24.
4. 希格斯场是一种“标量场”（它不指向哪个特定的方向），因而希格斯玻色子的自旋为0。光子、W玻色子和Z玻色子都是“矢量玻色子”，自旋为1 。
5. Carlo Rovelli,personal communication,31 March 2017.
6. 对于无静止质量的粒子，如光子，我们必须借助能量E的全相对论性表达式，即p=E/c，这里的p是线动量（也是一种粒子的特性）。（注：The expression $E=mc^2$ is very familiar,but,in fact,the full expression for the relativistic energy of an object is $E^2=p^2c^2+m_0^2c^4$,where p is the linear momentum and m_0 is the mass of the object at rest.If it helps,we can think of this as a statement of Pythagoras’ theorem.If two sides of a right-angled triangle are labelled pc and m_0c^2,then the relativistic energy is given by the square root of the hypotenuse of this triangle.For an object at rest,p=0 and this expression reduces to $E_0=m_0c^2$,where E_0 is the ‘rest energy’.For an object with zero rest mass such as a photon,$m_0=0$ and the expression reduces to E=pc.）
7. 德布罗意关系将代表波动性的波长（λ）和代表粒子性的动量（p）联系了起来：λ=h/p，其中h是普朗克常数。对于网球这样的宏观物体而言，只要它有可测得的动量，它的德布罗意波波长就会比波长最短的X射线和γ射线短很多。然而，对于像电子这样的微观粒子而言，观察到粒子性和波动性行为都是有可能的，只要我们以对应的方式设置实验（见第3 章）。
8. Lee Smolin,personal communication,21 July 2017.The paper in question is Abhay

Ashtekar,Carlo Rovelli,and Lee Smolin,‘Gravitons and Loops’,Physical Review D,44 (1991),1740–55; arXiv:hep-th/9202054v1,15 February 1992.

9. 戴森于20世纪40年代因证明费曼、施温格和日本理论物理学家朝永振一郎发展的不同的QED版本等价而知名。他的工作为QED 被广泛认可为电磁学的量子场描述奠定了基础。

10. Freeman Dyson,‘The World on a String’,New York Review of Books,13 May 2004.

11. Tony Rothman and Stephen Boughn,‘Can Gravitons be Detected?’,Foundations of Physics,36 (2006),1801–25; arXiv:gr-qc/0601043v3,2 December 2006,p.17.

12. Carlo Rovelli,‘Zakopane Lectures on Loop Gravity’,in John Barrett et al. (eds),Proceedings,3rd Quantum Geometry and Quantum Gravity School:Zakopane,Poland,February 28–March 13,2011; arXiv:gr-qc/1102.3660v5,3 August 2011,p.15.

13. Richard P.Feynman,QED: The Strange Theory of Light and Matter,Penguin Books,London,1990,p.85.

14. Robert Oeckl,‘A “General Boundary” Formulation for Quantum Mechanics and Quantum Gravity’,Physics Letters B,575 (2003),318–24; arXiv:hep-th/0306025v2,16 October 2003,p.1.

15. Carlo Rovelli,personal communication,21 June 2017.

16. Carlo Rovelli,quoted in Davide Castelvecci and Valerie Jamieson,‘You Are Made of Space-time’,New Scientist,12 August 2006.

17. Feynman said: ‘I don’t like that they’re not calculating anything.I don’t like that they don’t check their ideas.I don’t like that for anything that disagrees with an experiment,they cook up an explanation—a fix-up to say “Well,it still might be true”.’ Quoted in P.C.W.Davies and Julian Brown (eds),Superstrings: A Theory of Everything,Cambridge University Press,Cambridge,UK,1988,p.194.

18. Eugenio Bianchi,Leonardo Modesto,Carlo Rovelli,and Simone Speziale,‘Graviton Propagator in Loop Quantum Gravity’,Classical and Quantum Gravity,23 (2006),6989–7028; arXiv:gr-qc/0604044v2,13 May 2006,p.33.

19. The Barbero–Immirzi parameter is,in fact,already present in Ashtekar’s original formulation of the constrained Hamiltonian based on his ‘new variables’.It just happens to have the value i,the square root of–1.But this gives the problem that the variables of the theory are complex,requiring some care to ensure that the version of general relativity that can be recovered from the formulation is real,rather than complex.This problem can be avoided by replacing γ=i with γ as a variable real parameter (see Rodolfo Gambini and Jorge Pullin,A First Course in Loop Quantum Gravity,Oxford University Press,Oxford,2011,p.95).The expression for the area spectrum then becomes $8\pi\gamma l_p^2\sqrt{j(j+1)}$.Compare this with the expression given in Chapter

9,endnote 20.

第12章 费米子、演生粒子，以及物质的本质

圈量子引力理论从来都不是真正以万物理论为目标而建立的。如果理论物理学家证明它是一种可行的量子引力理论，那我们只能说它可以与现有的量子场论并列，共同描述物理世界——量子场论成功地描述了亚原子与亚原子核尺度的物理现象。

这句话说起来容易，但关于这到底意味着什么，又将如何操作，物理学家还完全不清楚。圈量子引力与标准模型的量子场论完全不同。后者描述的是假设有一个背景时空的情况下物质与力粒子的动力学过程，而前者则描述了演生出来的时空，因此这会给人一种感觉——圈量子引力最终会与标准模型理论发生交集。就像圈量子引力本身一样，标准模型应该也能以不需要背景时空的方式重新表述，虽然这一点并不意味着能将标准模型与引力理论统一起来，但谁知道呢？

用自旋泡沫来重新表述标准模型（而非依赖背景时空）可能有一个好处，就是让量子场论本身变得更为有序。人们一直以来都认为，如果能成功将时空量子化，或许有助于调节QED这样的理论，使其不再需要重正化。

为了理解这意味着什么，有必要回顾一下我们在第4章中提到的内容。在QED的方程中，有些项会因为电子与自身产生的电磁场相互作用而飙升至无穷大。重正化是一种数学上的修补办法，让无穷大的项彼此抵消，只留下在物理上有意义的预测结果。但如果无穷大的项从一开始就不会产生，那显然更好。不管怎样，无穷大只是一个纯数学上的概念，它在真实世界中并不存在。方程中出现了无穷大，就说明我们的数学描述在某些本质方面没有准确地描述现实。

这类问题在很早以前就出现过。古希腊哲学家埃利亚的芝诺就提出

了一个著名的悖论：阿喀琉斯与乌龟赛跑，显然他们的能力有巨大的差距，因此荣誉感和公平感很强的阿喀琉斯决定让乌龟先跑，等到乌龟跑了一半路程以后他再开始追赶乌龟。看起来阿喀琉斯似乎肯定会赢，但根据逻辑，当阿喀琉斯跑到自己出发时乌龟所在的位置，乌龟显然又向前爬了一段，而等到阿喀琉斯跑过这段距离时，乌龟又向前爬了一小段了。以此类推，每当阿喀琉斯跑到乌龟上一个时间点所在的位置时，乌龟总是又往前爬了一小段，这么看，似乎阿喀琉斯永远都追不上乌龟。

芝诺悖论的核心在于“一条连续的线段可以被分为无穷多个点”，这是一个看似没有任何问题的观察结果。如果阿喀琉斯与乌龟之间有无穷多个点，那么似乎无论阿喀琉斯跑得有多快，他也不可能在有限的时间里追上乌龟。

找到这个问题的解答并不难：尽管一条连续的线段在数学上可以分成无穷多个点，但这并不意味着真实世界中的一段距离（或者一片面积、一块体积）也可以从物理上这样划分。在真实世界中，不存在无穷大这种东西。(注)

这直接让我们想到，也许物质世界并不是连续而无限可分的，而是由离散的原子组成的。20世纪甫始，物理学家学到的第一个重要的结论，就是我们此前认为是连续的所有物理量——质量、辐射和能量——都是离散的。宇宙在本质上是由一个个小块和小点组成的。

如果把这套逻辑推向极致，我们就会得出这样的结论：空间（或时空）本身也不是连续和无限可分的。或许量子场方程中之所以会出现无穷大的量，以至于需要复杂的重正化技巧来消除（还不一定能消除），正是因为我们假设背后有一个连续的背景时空。

从这一方面，我们就能看到弦论和圈量子引力理论的前提假设之间真正的区别了。弦论从本质上来说是一个粒子物理理论，它尝试通过假设粒子不是无穷小的点粒子，而是延展的二维或是多维的物体，来消除

无穷大的量带来的问题，因此，得到的就是连续时空背景下的一个关于弦的理论。为此，物理学家需要将额外的维度隐藏起来，还需要引入超对称这样的假设，以让该理论不那么难以驾驭。这消除了点质量带来的问题，但并没有解决连续时空假设带来的问题。在弦论中，阿喀琉斯仍然追不上乌龟。

与之相反，圈量子引力是一个关于时空几何形状本身的理论。它致力于通过将广义相对论与量子力学结合起来，表明时空是离散而非连续的，从而消除无穷大量。

这一想法听起来不错，但它对于大自然的影响并不仅仅在于时空的形状（以及无质量的引力子）方面。现实比这复杂得多。理论物理学家随后的任务，是把有质量的粒子融入这一图像中。既然所有物质都由费米子（夸克和轻子）组成，就意味着我们需要把自旋泡沫圈量子引力与费米子场耦合起来。

关于这一问题，李·斯莫林、卡洛·罗韦利和他们的同事早在20世纪80年代就有了想法，但边界方法在计算引力子传播函数方面的成功，使得理论物理学家决定更专注地寻找将费米子的量子场与自旋泡沫描述联系在一起的方法。虽然之前有人做过尝试，但该领域如今已经足够成熟，也许正是再次着手尝试的时机。

圈量子引力的研究者并未抱有不切实际的幻想。他们主要的关注点就是找到能将量子力学与费米子结合起来的办法。当时，关于与自旋泡沫相耦合的费米子理论在大尺度极限下是否会与标准模型量子场论相等价，还没有人清楚。换句话说，理论物理学家自己也不能确定将电子与自旋泡沫耦合起来能否在大尺度极限下产生QED。“现在我们能完成这个任务吗？”罗韦利设问，“不完全能。有无数的暗示表明理论在大尺度极限下应该能得到正确的结果，但计算过程仍然极为烦琐，情况十分复杂。”[注]

而且，就算理论在大尺度极限下得到的结果是对的，用自旋泡沫圈量子引力来计算确立已久的结果（如QED预言的电子的g因子），其意义也有限。罗韦利解释道："没有人会认为通过重新计算布鲁克林桥的稳定性来检测广义相对论是有意义的，因为用牛顿力学会得到同样的结论。"[注]

他的说法当然是对的，但有必要指出，广义相对论在平直时空和低速的条件下确实能还原成牛顿引力理论——这就是爱因斯坦的一致性原则。因此，如果自旋泡沫圈量子引力不能还原到QED，这个理论就是可疑的。我猜，物理学家永远希望能将一个普朗克尺度下的理论的适用范围外推至量子场论的亚原子核和亚原子尺度，并从中获得一些新的解释——在离散、演生的时空中理解夸克与电子的行为。然而，实际上，17个数量级的差异表明，这一希望哪怕确实存在，也极其渺茫。

罗韦利与马赛理论物理学中心的欧金尼奥·比安基（Eugenio Bianchi）、韩慕辛和沃尔夫冈·威兰（Wolfgang Wieland），以及宾夕法尼亚州立大学的埃莱娜·马利亚罗（Elena Magliaro）和克劳迪奥·佩里尼（Claudio Perini）合作，研究出了如何将费米子场融入自旋泡沫中，论文发表于2013年。这一方法"出人意料地简单"。[注]从某种程度上讲，这些理论物理学家只是复制了将费米子与QCD格点相结合的方法，并利用了自旋泡沫在边界处趋向于时空点的动态晶格这一点。难点在于找到最好的方法来写出费米子的作用量（即描述一个费米子从一处到另一处的物理量），而他们最终成功找到了一种数学技巧来完成这件事。

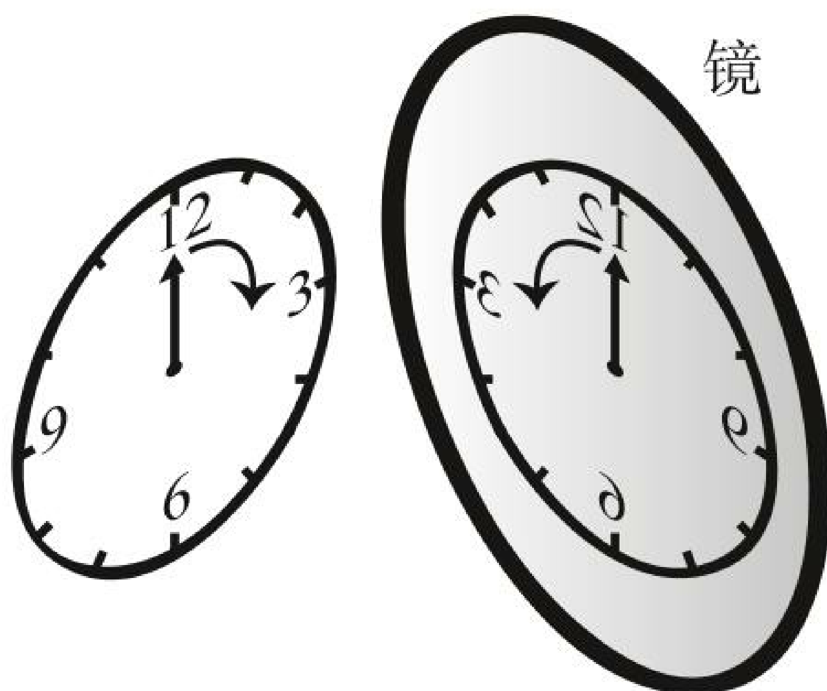
其结果是，他们建立了一种引力与费米子相互作用的量子理论。

费米子的性质由一种叫作"CPT对称"的对称性所主宰。"C"代表电荷共轭：如果一个粒子的物理学性质在C对称性变换下不变，意味着将其电荷换成大小相等、符号相反的电荷（也就是说，用对应的反粒子来代替该粒子）以后，该粒子的性质不会发生改变。"T"代表时间反演：

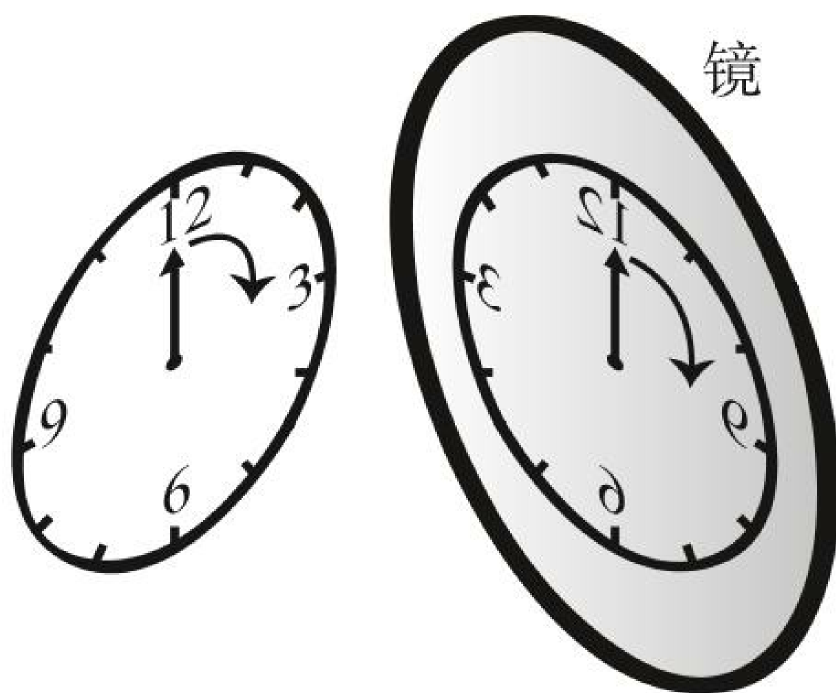
在描述该粒子动力学过程的方程中将*t*换成-*t*。虽然在我们的经验里，时间只会沿着一个方向流动，但物理学方程一般不管时间往哪个方向流动——不管事件是顺序发生还是倒序发生，方程都不变（我们称这种情况为物理学定律在T对称性反演下不变）。

“P”代表的则是宇称变换或宇称反演，关于这一点我需要多解释一下，让我们先从粒子描述转为波动描述。想象一道正弦波，它上下振荡，最高点是波峰，最低点是波谷。波函数的一半振幅是正的（在它从原点升向最高点又回来的过程中），一半振幅是负的（在它沿着轴向下降到波谷又回来的时候）。波函数的宇称描述的就是，如果我们改变所有的空间坐标轴的正反符号（即颠倒左右、上下、前后），会不会改变这道波的传播方向。同时改变三条坐标轴的方向，相当于把这道波变成了它在一面镜子中的倒影，它的视角也变了——左变成右，上变成下，前变成后。

如果波函数在这样一面“宇称之镜”中的倒影与原本的波函数振幅相同，我们就说这个波函数具有偶宇称；如果镜中的倒影与原本的波函数振幅相反，我们就说这个波函数具有奇宇称。（如图22所示。）



（a）



（b）

图22 一个物体在宇称之镜中的倒影可能有两种结果：（a）左边的钟在每个方向上都与右边镜中的钟完全对称，在这种情况下宇称守恒；（b）左边的钟与右边镜中的钟并没有完全对称，在这种情况下宇称不守恒

同自旋一样，“宇称”这一概念在经典物理学中找不到太好的类比例子来帮助我们理解。它与基本粒子相互作用中的角动量密切相关，并深刻影响着它。直到20世纪50年代末，物理学家发现的所有相互作用中宇称和角动量都是守恒的。换句话说，如果发生相互作用的所有粒子的总宇称是偶宇称，那作用之后得到的所有粒子的总宇称也是偶宇称。总宇称为奇的粒子同样如此。

这看起来是符合物理学家的直觉的。自然界的不变法则，怎么可能会偏向左右、上下、前后中的一个呢？回想一下，罗杰·彭罗斯在发展出自旋网络的数学形式之前问了这样一个问题：一个电子怎么会知道哪个方向是“上”呢？无疑，大自然的作用力是不可能偏向左手性和右手性中的任何一个的。

这样的推理看起来很合理，然而，这不符合物理学家观察到的实际现象。在所有电磁力、引力与强色力相互作用中，宇称都守恒，但20世纪50年代中晚期科学家进行的一系列实验表明，在弱相互作用中，大自然似乎更偏爱某一种“手性”实际上，通常来讲，只有左手性的粒子和右手性的反粒子能进行弱相互作用。注

这一结果震惊了很多老一辈的理论物理学家，比如泡利。就在得知实验结果的几天前，他还写信对朋友说：“我不相信上帝是个弱左撇子，我愿意押一大笔钱赌实验会给出对称的结果。”注幸运的是，他最终并没有投注，因为他后来承认道：“这会让我输一大笔钱（我可损失不起）。”注

最困扰泡利的不是为何弱相互作用偏爱左手性，而是为何强相互作用没有显示出这种偏爱。区别在哪里？

这种左手性和右手性统称手性（chirality）。科学家曾以为，虽然电荷共轭和宇称守恒分别在一些粒子相互作用中会被破坏，但它们结合而产生的CP对称性仍然总是守恒的。然而，1964年普林斯顿大学的物理学家詹姆斯·克罗宁（James Cronin）和瓦尔·菲奇（Val Fitch）在布鲁克海文国家实验室做的实验表明，在中性K介子（一种由下/反奇异夸克和奇异/反下夸克混合形成的介子）发生的某种衰变过程中，CP对称性也被破坏了。我们只有再加上时间反演对称性，才能让自然再次回到正常的状态。CPT对称性的组合才是永远不被破坏的对称性。

没有人知道为什么会这样。

韩慕辛与罗韦利证明，在与自旋泡沫相耦合时，费米子传播函数的CPT对称性不变，这与我们的要求相符。他们发现，边界行为可以通过自旋泡沫振幅中嵌入的费曼图简单地描述。毋庸置疑，费米子场相互作用的物理规律也能以同样的方式显现出来，也就是说，原本被认为只能在背景时空中运作的量子场，也能在自旋泡沫的海洋中自然存在。

然而，还有一个问题。森与阿什特卡已经选定了原始的自旋变量以反映手性，因此原则上将手性费米子引入自旋泡沫圈量子引力理论是可以的。然而，一旦费米子场被固定在格点上，它们的行为就变得很异常，显现出一种不自然的费米子加倍（fermion-doubling）现象：出现了奇怪的镜像态，每个原本左手性的费米子在每个空间维度方向上都产生了一个右手性的镜像。

格点QCD中也有这个问题。格点QCD中有一条强大的止步定理，这条定理由丹麦物理学家霍尔格·尼尔森和日本物理学家二宫正夫提出，表明只有左手性与右手性费米子的耦合强度相等时，自由费米子在离散格点模型中才能得到连续的结果。然而，弱相互作用只青睐左手性费米子，因此耦合强度不可能相等。在格点QCD中，理论物理学家引入了多种应变方法来除掉额外的费米子，以绕过该问题，比如人为破坏手性对称，把镜像粒子推向一个更高的能量范围，使其不再发生耦合，从

而影响理论计算。

韩慕辛与罗韦利考虑了这些应变方法中的一部分。虽然有一些问题，但总体来说他们还是乐观的。“在我们看来，这条路不是毫无希望的，原因如下：将自旋泡沫模型中所有的几何形状加起来，加倍的费米子就互相抵消了，就像随机点阵中的情况一样，因此这一思路是有希望的。”[注]但斯莫林并不同意这一点，他指出，费米子加倍的现象在随机点阵中也会出现。

2015年，斯莫林与雅各布·巴尼特（Jacob Barnett）在圆周理论物理研究所合作，详细探究了费米子加倍的现象，证明原本的正则圈量子理论无法解决这个问题，因此无法用来描述手性费米子。[注]他相信，这是圈量子引力理论在描述自然方面的主要障碍之一。“关于在自旋泡沫模型中如何解决这一难题，我们有一些想法，”他解释道，“但还没有攻克它。”[注]这仍然是个悬而未决的问题。

这类问题迫使理论物理学家停下来，仔细思考他们正在使用的数学工具。但这些问题也让我们怀疑，或许我们完全不了解这些粒子的本质。或许这些问题的存在并不是因为我们数学技巧不足，而是在提示我们，关于物质实体的本质，还有更多我们没有掌握的奥秘。

前文提过，圈量子引力理论是由互相连接的力圈形成自旋网络而构建出来的，其节点表示体积量子所在的交叉点，连接则表示相邻节点交界处形成的表面，即面积量子。如果我们回到由闭合的圈形成的空间这一想法，费米子就可以看成开放的圈，其自旋量子数为1/2。斯莫林解释道：“在该理论发展的早期，最激动人心的时刻就是我们讨论费米子如何从自旋网络中的自由端或小孔处演生出来的时候。”[注]

如果力线不形成闭合的圈，它们的起点和终点就必须有电荷（正电荷或者负电荷）或者色荷（红、绿或蓝）。这一想法看起来有些熟悉：

在弦论的早期版本里，物质粒子就由开放的弦来表示。其实，到这个程度，既然弦论和圈量子引力都是在力线的模型上建立起来的，它们很显然基本上是从同一点出发的，不同的是下一步往哪个方向走，以及做出哪些假设。

开放的圈在自旋网络上以一个额外的–1/2自旋的“面”的形式存在，将物质粒子紧紧地捆绑在演生时空的结构上。这种景象不禁让人回想起惠勒和米斯纳设想过的图像。他们1957年提出，带电的粒子可能只是电场线穿过普朗克尺度的虫洞，形成假想中的隧道，将时空中不同的点串在一起。[注]他们想象这些力线在一个虫洞中消失，在另一个虫洞中重现，力线其实形成了闭合的圈，但因为它们总是在这里消失，在那里重现，看起来就像是开放的圈。换句话说，通过这个假设，物质粒子可以完全只通过引力导出。

惠勒将这一想法称为“已统一理论”。[注]与其努力统一引力与电磁力（这是爱因斯坦多年来尝试却徒劳无功的事），为什么不干脆假设电子自身就是时空本身的基本属性呢？这样的话，理论就会变得十分简洁而优雅。

斯莫林于1994年证明，从广义上来讲，将广义相对论与费米子耦合起来的理论，与不包含物质但容许某种极简主义虫洞存在的理论是完全等价的。就背后的物理学机制而言，电子与虫洞完全是同一件事。在后来关于自旋泡沫费米子的工作中，这一结论已显而易见了。2013年，罗韦利与同事提到，在某些固定的时间，费米子圈是非局域性的——它在时空中的一部分消失，又在一个遥远的点重现。

这听起来可能很奇怪，但费米子与引力物体的关联似乎比我们想象中的还要深。我在第2章提到过德国数学家卡尔·施瓦西找出了爱因斯坦引力场方程在大尺度、不带电、非旋转的球对称条件下的一系列解。这些解承认了黑洞存在的可能性，被称为施瓦西黑洞。如今，我们知道黑

洞解共有4种，其中一种适用于旋转、带电的情况，以新西兰数学家罗伊·克尔（Roy Kerr）和美国物理学家特德·纽曼的名字命名。

有趣的事情出现了。克尔–纽曼黑洞的g因子恰好等于2，与QED中应用辐射修正之前的“狄拉克电子”等价。虽然我们如今倾向于认为黑洞起源于大型天体（如恒星）的引力坍缩，但理论并没有排除微观黑洞存在的可能性。㊟当然，我们有各种各样的理由认为电子是克尔–纽曼黑洞的这一想法不靠谱，但这种巧合恰恰是理论物理学家获得灵感所需要的。有些人认为，这一巧合反映，“量子理论与广义相对论在深处是同源的”。㊟

不管理论物理学家以何种方法让费米子从引力线中诞生，哪怕实现了这一点，离解释构成粒子物理标准模型的三代物质粒子、力粒子和希格斯玻色子也很远。不过，斯莫林有一天偶然读到了阿德莱德大学一位年轻的澳大利亚理论物理学家森丹斯·比尔森-汤普森（Sundance Bilson-Thompson）发布的预印本论文，感觉这篇论文的思路或许可以构建让标准模型粒子从自旋网络的扭曲与交缠中演生出来的理论。

如今，斯莫林仍然把全部精力投入圈量子引力理论，从中挖掘可以检验的预言，但他无穷无尽的精力和对新知的渴望经常会带领他进入更新的领域。他当然对将圈量子引力变为一个更有预测性的理论的具体细节感兴趣，也孜孜不倦地投身于做出能被实验检验的理论预测（这是科学方法的核心），他在这方面的重要角色毋庸置疑。2006年，斯莫林的《物理学的困惑》与哥伦比亚大学数学物理学家彼得·沃伊特的《连错误都算不上》（*Not Even Wrong*）两本书几乎同时出版，两本书都激烈地批判了超弦理论及其文化，引起了一场“超弦战争”。斯莫林本性不喜欢冲突和对抗，但也不可避免地卷入了一系列关于科学的本质以及未来的理论物理学的争论之中。㊟

但同时，斯莫林更关心的是，一个以基本量子的形式描述空间的理

论将如何讲述最深层面的物理现实的本质。他并不讨厌形而上学本身，甚至更愿意投入其他人不愿投入的思考当中。量子力学与广义相对论这两个已经被广泛接受的理论构成了我们关于物理现实的“权威”描述，它们自身一开始很可能也是因形而上的思考而诞生的。但这些思考与经验上可观察的结果联系在一起，因此它们是科学的。

随着几代夸克的存在证据越来越多，一些理论物理学家不可避免地开始思考它们会不会是由更基础的东西组成的。还有一些理论物理学家希望找到一些方法，把这些不同种类的夸克与轻子统一起来，视之为同一组物质基本单元组成的不同复合体，这组物质基本单元被称为“前夸克”（prequark）或“前子”（preon）。

1979年，加州斯坦福直线加速器中心的哈伊姆·哈拉里（HaimHarari）与伊利诺伊大学香槟分校的迈克尔·舒普（Michael Shupe）各自独立发表了一个只包含两个粒子与两个反粒子的前子模型。它们的自旋为1/2，电荷分别为0和1/3，可以用它们来构建第一代夸克（上夸克、下夸克）和轻子（电子、电子中微子）以及对应的反粒子。第二代、第三代夸克与轻子可以解释为第一代夸克的能量更高（即质量更大）的状态。

哈拉里将带电的前子标记为*T*，电中性的前子标记为*V*（来自希伯来语版本的《创世记》，它认为世界诞生于“Tohu va-Vohu”，即“无形与虚空”）。㊟三种不同色、净电荷都为+2/3的上夸克来自*TTV*、*TVT*、*VTT*的组合；电子来自$\overline{TTT}$的组合，其中$\bar{T}$代表*T*的反粒子。轻子只由一种前子组成（例如*TTT*或者*VVV*，或者它们的反粒子）组成，因此不会表现出颜色。

这种模型也能表示力粒子。胶子改变了夸克中前子的顺序，如将*TTV*变成*TVT*，因而改变了夸克的色（例如从红变绿）。W玻色子和Z玻色子被认为是由电子与中微子及其反粒子组合而成的。举例而言，如

果W^+是*TTTVVV*（一个正电子与一个中微子），那么它对一个下夸克（如$\overline{VVT}$）的作用就是将它变成一个*TTV*的上夸克。[注]

这个系统看起来可能很人为，很不自然，它也确实如此，可包含味、色且拥有令人难以想象的分数电荷的原始夸克模型也没有比它更自然。

比尔森-汤普森将基于点粒子的哈拉里-舒普模型变成了一个拓扑学“玩具模型”，用三种“丝带”以不同方式编织形成的图作为基础。一条丝带可以带电（对应于哈拉里的*T*），也可以为电中性（*V*），而传递力的玻色子则没有经过编织。第二代和第三代粒子只是编织方式比第一代更为复杂一些。比尔森-汤普森发展的这一模型比哈拉里-舒普的原始模型更简单，而且有额外的好处：丝带既可以向左编织，也可以向右编织，可以形成两种镜像对称的图像，从而为手性提供了基础。

关于这种丝带到底是什么，比尔森-汤普森没有给出解释，不过他“不太认真地提到它们可能是彼此缠绕在一起的微虫洞”。[注]

斯莫林后来承认：“在读到这篇文章的第一时间，我就知道这就是那缺失的一环，因为比尔森-汤普森研究的这种‘编织’完全可以出现在圈量子引力中。”[注]在第8章中我们提过，在1986年2月圣巴巴拉晴朗的一天，斯莫林与雅各布森首次发现了广义相对论场方程的自旋联络表述的精确解。斯莫林知道比尔森-汤普森的“编织的丝带”正可以被看作这种精确解，因而提出了一个令人震惊的假设：标准模型中所有的粒子都表现为引力线不同的扭曲和编织方式。

“我们在1987年就知道编织了，”斯莫林承认，“但我们从来没想过它会与某种物理实体联系在一起。”[注]几年后，在完成了“连接性”论文并与马科普洛合作之后，他关于如何从圈到可以编织和扭曲的丝带有了更好的想法。

设想粒子从时空本身中诞生，是同时实现惠勒的“已统一理论”和19世纪开尔文爵士认为原子是“以太的纽结”的观点的最终方法。但这要如何实现呢？斯莫林与马科普洛邀请比尔森-汤普森来合作，他们三人进一步优化了这一模型，让三种丝带变成一张自旋网络与一套普通节点集之间的三种连接。[注]比尔森-汤普森在其模型中引入的电荷可以用连接向一个方向扭曲（1/3正电荷）或向另一个方向扭曲（1/3负电荷）来代替。

让形成上夸克的三条丝带中的两条扭曲起来，就得到了+2/3的总电荷。鉴于在三条丝带里选择两条丝带扭曲有三种情况（可能扭曲第一条和第二条、第一条和第三条，或者第二条和第三条），而这就对应于三种不同色的夸克。类似的逻辑可以用在下夸克上。至于电子，因为只有三条丝带都扭曲才能形成-1的总电荷，因此不可能形成不同的色。不带电的粒子，如电子中微子与反中微子，则不包含扭曲。

丝带之间也可以“编织”起来。从左到右、先下后上的编织图案表示左手性粒子，从右到左先下后上的编织图案表示右手性粒子。这样不会形成镜像图案，斯莫林认为采用了这种方法，理论物理学家就不会遇到费米子加倍的问题了。

只用两种不同的扭曲和两种交叉编织方式，形成的一系列“编织态”就足以解释组成标准模型的第一代粒子。图23（a）展示了描述上夸克、下夸克和电子的图案，左列是比尔森-汤普森原始的图案，右列则是由量子引力导出的图案。图中只画出了一种色的夸克，且所有粒子都是左手性的。

编织态的构造方式决定了电子中微子只能是左手性的，反电子中微子只能是右手性的，这与粒子相互作用的观测结果相符，如图23（b）所示。理论物理学家猜想，第二代和第三代粒子或许也包含类似的编织结构，只是相互之间的交叉更多。

当然，还有很多现象是这种图像所不能解释的，比如粒子的质量，因此研究人员在最开始的激动之后，马上开始了更冷静的分析。关于第二代和第三代粒子或许也能用类似编织结构来描述的猜测被证明是不可靠的，理论物理学家无法建立能描述它们的简单编织结构。还有人觉得第一代的编织结构有些过于稳定，使得演生粒子可以在时空中传播，却不能相互作用。为了解决这一问题，比尔森-汤普森、芝加哥的路易斯·考夫曼和圆周理论物理研究所的乔纳森·哈克特（Jonathan Hackett）已经着手研究一些更复杂的模型。

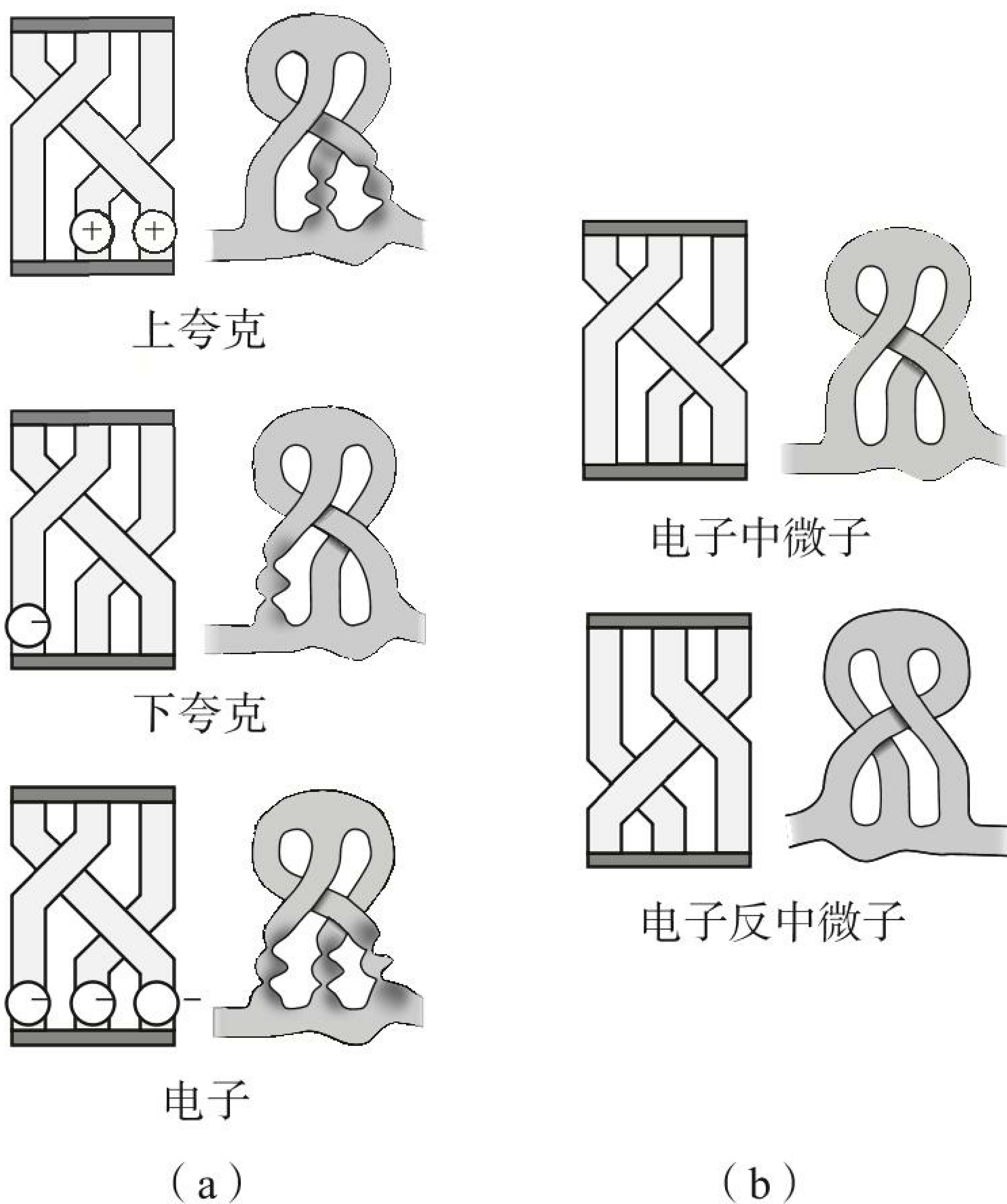


图23 斯莫林与马科普洛将比尔森-汤普森的拓扑玩具模型［（a）与（b）的左列］变成了圈量子引力中一个包含引力线的编织与扭曲的系统［（a）与（b）的右列］

这些尝试成功的希望不大。不管怎么样，圈量子引力理论远称不上是关于演生时空的完善理论，其中有很多问题尚未得到解决。通过自旋网络来同时描述时空和物质以及力粒子，仍然只是一种迷人的可能性。

如果你能在有一些真正的新见解的情况下将它圆满完成，这就会是一种出色的数学技巧。

不过，就截至目前的证据而言，它还说不上是种科学理论，更像是一种魔法。

---

1. 芝诺悖论还有另外一个“解决”方法，即阿喀琉斯每次要追赶的新增距离都变得越来越短，而我们知道这种越来越短的增量之和是一个有限的值，意味着阿喀琉斯完全能在有限的时间内跨过这段距离。但这是一个纯粹的数学论证：为了弥补将有限距离分成无限多段的“不自然”的数学划分所带来的问题，我们引入了另一个“不自然”的无穷多项之和来弥补。
2. Carlo Rovelli,personal communication,10 April 2017.
3. Ibid.
4. Eugenio Bianchi,Muxin Han,Carlo Rovelli,Wolfgang Wieland,Elena Magliaro,and Claudio Perini,‘Spinfoam Fermions’,Classical and Quantum Gravity,30 (2013),235023; arXiv:gr-qc/1012.4719v2,21 October 2013,p.1.
5. Wolfgang Pauli,letter to Victor Weisskopf,17 January 1957.Quoted in Robert P.Crease and Charles C.Mann,The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics,Rutgers University Press,New Brunswick,NJ,1986,p.209.
6. 在β放射性衰变中，一个下夸克转变成一个上夸克（将一个中子转变为一个质子），放出一个W–粒子，W–粒子进一步衰变成一个左手性的电子和一个右手性的电子反中微子。
7. Wolfgang Pauli,letter to Victor Weisskopf,27 January 1957.Quoted in ibid.,p.209.
8. Muxin Han and Carlo Rovelli,‘Spinfoam Fermions: PCT Symmetry,Dirac Determinant and Correlation Functions’,Classical and Quantum Gravity,30 (2013),075007; arXiv:gr-qc/1101.3264v2,6 March 2013,p.24.
9. See Jacob Barnett and Lee Smolin,‘Fermion Doubling in Loop Quantum Gravity’,arXiv:gr-qc/1507.01232v1,5 July 2015.
10. Lee Smolin,personal communication,8 April 2017.
11. Ibid.
12. 虫洞还是假想中的概念，因为从来没有人看见过虫洞（或者更准确地说，从来没有人观察到确定无疑的、只能由虫洞的存在解释的物理效应）。但它确实可以根据爱因斯坦广义相对论场方程的真实的解导出。

13. John Archibald Wheeler,with Kenneth Ford,Geons,Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics,W.W.Norton,New York,1998,p.267.

14. 在LHC于2009年首次运行之前，就有人担心高能质子–质子碰撞会创造出微型黑洞，从而导致世界末日。不过，我们已经看到，LHC在过去的10 年里一直在长时间运行，据我所知，世界末日并没有出现。

15. Herbert Pfister and Markus King,‘The Gyromagnetic Factor in Electrodynamics,Quantum Theory and General Relativity’,Classical and Quantum Gravity,20 (2003),205.

16. Lee Smolin,personal communication,7 September 2017.

17. Haim Harari,‘A Schematic Model of Quarks and Leptons’,Physics Letters B,86 (1979),84.

18. 前文说过，粒子遇到它们对应的反粒子时会瞬间湮灭。

19. Sundance Bilson-Thompson,quoted in Davide Castelvecci and Valerie Jamieson,‘You Are Made of Space-time’,New Scientist,12 August 2006.

20. Lee Smolin,The Trouble with Physics: The Rise of String Theory,the Fall of a Science,and What Comes Next,Penguin Books,London,2008,p.254.

21. Lee Smolin,quoted in Davide Castelvecci and Valerie Jamieson,‘You Are Made of Space-time’,New Scientist,12 August 2006.

22. Sundance O,Bilson-Thompson,Fotini Markopoulou,and Lee Smolin,‘Quantum Gravity and the Standard Model’,Classical and Quantum Gravity,24 (2007),3975–94; arXiv: hep-th/0603022v2,21 April 2007.

第13章 为什么“这里”会变成“那里”

卡洛·罗韦利与李·斯莫林之间的合作关系持续了30年，他们也是亲密的朋友。然而有两件事是他们万万不会认同对方的，而且双方都坚持己见。第二件事是时间的本质，我们在第16章会回到这个话题，而第一件事就是量子力学的诠释。

观点不一致并不一定是件坏事。罗韦利解释道：“李和我一直在交流看法。我们保持着一种奇特的科学上的关系——在各种各样的问题上都有不同意见，但尽管如此，或者说正是因为如此，我们能互相学习并互相影响，我相信这种影响比我们意识到的还要深刻。”[注]斯莫林同意罗韦利的话：“意见相左从未给我们的友谊造成压力。事实上情况完全相反：如果我们关于所有事的观点都相同，我们两个人中的一个就多余了。我们总是会倾听对方的意见。”[注]

我们在前文已经看到，爱因斯坦对于量子力学暗示的物理现实本质深感不安。他认为，量子概率与不确定性主宰的微观世界与更符合人们常识的经典世界之间显而易见的矛盾，暗示量子理论在某种基本的意义上是不完备的。[注]自爱因斯坦与玻尔的著名论战之后，物理学家提出了各种各样的关于量子理论的诠释和扩展方法，都是为了回答这个“完备性问题”。

斯莫林在大一的时候读了原始的EPR论文，自此就对量子力学的诠释感到很不适。与爱因斯坦、薛定谔、贝尔、莱格特（以及我们后面会知道的彭罗斯）一样，他倾向于认为，量子力学在某个很重要的方面是不完备的，它缺失了某种东西。

罗韦利认为量子理论是具有革命性的、意义深远的理论，从任何一

个角度讲，都不能说它是不一致的或者不完备的。他在学生时代短暂地体验过LSD（麦角酸二乙基酰胺）[注]带来的感觉，这让他意识到，现实与人们的感知可能大不相同："我认为，致幻剂之所以会对人造成很大的影响，是因为它就像一种冥想体验。你以一种完全不同的方式看到这个世界，意识到自己的感知是有限的。"[注]他不认为量子力学的反常识之处是一个需要解决的问题。[注]

斯莫林仍然能生动地回忆起他、罗韦利和路易斯·克兰都在耶鲁的时候，三人之间的大脑风暴会议。他们翻来覆去地讨论现实的元素与观察者之间的关系、戈特弗里德·莱布尼茨的哲学思想，以及量子力学。斯莫林回忆："我记得当时我们每个人都根据自己的基本概念建立了自己的理论，表述了量子力学的相关性概念。"[注]

在这些讨论的基础上，罗韦利形成了自己独有的对量子力学的诠释。与哥本哈根学派的玻尔、海森堡和泡利，以及巴斯·范弗拉森（Bas van Fraassen）和米歇尔·比特博尔（Michel Bitbol）等哲学家一样，他建立了一个自认为能清晰描述量子理论的逻辑结构，并认为量子力学已经是一门完备的科学，没有什么其他需要添加的东西了。

他认为，需要改变的是我们对量子力学告诉我们的事情的理解方式。

罗韦利的诠释首先发表于他在20世纪90年代末发表的两篇论文中。后来，在2005—2007年，他又与费代里科·劳迪萨（Federico Laudisa）和马泰奥·斯梅尔拉克（Matteo Smerlak）合作，进一步提炼了自己的观点。这一诠释的基础来自相对论与量子力学中"观察者"的角色。

前文提过，在相对论中，爱因斯坦花了很大力气才把观察者重新引入物理图像中，让他们在物理实体之内拿尺子和钟表测量。我们看到，这样做的结果是空间与时间扮演的角色发生了巨大变化，时空不再处于

崇高的背景地位。相对论推翻了宇宙中存在绝对的“上帝视角”的观念，把空间和时间变成完全相对的概念，依赖于观察者与被观察者的物理环境和相互作用而存在。

我还需要再次提醒一下，这里我们所说的“观察者”并不一定指人类观察者，虽然我们同样需要记住，我们寻求的对物理世界的描述归根结底还是要被我们人类独有的智能所理解的。

观察者在量子理论中也扮演着重要的角色。假设我们想对某个特定的量子系统进行一些测量（具体是什么测量并不重要），我们知道，要想应用量子理论的规则，我们首先要以波函数的形式总结我们对这个系统的物理信息掌握了多少。该系统可能拥有一系列不同的可能的量子态，每个量子态都对应着不同的分量。通常来说，波函数会处于叠加态的形式，也就是说，我们要把所有可能的量子态的贡献都加起来——举例而言，我们可以说波函数处于一部分的“这个量子态”与另一部分的“那个量子态”的叠加。

下一步要做什么，依赖于我们准备做哪种形式的测量。假设我们的仪器的测量目的是揭示量子态与某条轴或者某个场的对齐情况——上还是下，那么我们无须关心这种对齐到底是如何实现的，或者如何诠释这种现象，只需要知道测得的量子态由量子系统及测量仪器的本质所决定。

为了预测结果，我们需要运用量子理论的其他一些规则，以把“这个量子态”与“那个量子态”的叠加转化为“上”与“下”的叠加，这个过程叫作改变波函数的基底。我们有充分的自由来做这件事，这是因为只要我们遵守规则，以正确的配比把各个分量加在一起，就可以用任意一组基底来表示波函数。(注)

假设在改变基底之后，我们就得到了一个由“这么多”的“上”和“那么多”的“下”组成的波函数。这样一来，我们就可以预言，在测量中得

到“上”的概率是“这么多”的平方，得到“下”的概率则是“那么多”的平方。(注)如果正确应用了规则，两个概率值相加就应该等于100%。

现在，我们开始测量，测量的一瞬间波函数随之坍缩，整个系统变成“下”状态。如果我们准备一系列同样的系统，对每个系统进行相同的测量，我们可能会得到这样的结果：下，上，上，下，下，上，下，下，下……最终我们会发现，得到“上”的频率与量子力学预言“上”状态出现的概率是一致的，“下”也是一样。量子世界看起来一切都好。

然而，从贝尔和莱格特的工作，以及一系列检验量子力学的非凡实验中，我们看到，要想在测量之前就确定这一系统实际状态的物理属性是不可能的。我们可以假设量子系统已经处于“上”状态或者“下”状态中的一种（也许存在某种隐变量，它通过某种机制告诉了量子系统我们会进行什么样的测量），而测量只是把系统从一开始就选好了的状态揭晓给我们看。但我们现在已经知道，如果我们假设这样的隐变量存在，从这一基础上导出的预测与现实相当不符。

量子力学让我们感到不适的另一点是，我们完全没有任何物理机制解释波函数到底是如何坍缩的。我们只是假设系统一开始处于叠加态，然后在测量的过程中，不知怎么的系统就从“上”和“下”两个可能态的叠加，变魔术般地变成了一个实际的结果——“上”或者“下”，只能是二者之一。

罗韦利认为，我们之所以对此感到不适，是我们看待量子现象的方式不对。如果只关注我们实际上知道的信息，这一切就都好接受多了。我们总倾向于认为，这些量子态就是系统的物理状态。罗韦利认为，这种逻辑起源于薛定谔在波动力学中引入了氢原子的波函数。海森堡的矩阵力学与薛定谔的波动力学等价，但矩阵力学在表现原子物理学现象方面不甚直观，为了提供一种“视觉化效果”，薛定谔热衷于把波函数描述成一种有物理意义的、字面上的波：

在第二篇重磅论文发表出来以后，物理学界完全陷入了混乱……在第二篇论文中，薛定谔着重用光学的粒子做了类比：粒子的轨迹就像光的轨迹一样，是背后物理空间中的物理波行为的近似。也就是说，（波）函数代表“实际物体”，就像电磁场是光线物理本质背后的“实际物体”一样。[注]

尽管薛定谔关于波函数的字面诠释已经被淘汰了，但随着波函数的概念被一个更模糊不清的概念——“态矢量”所代替，波函数承载着某种物理意义这一观念也被移植到对态矢量的诠释中。[注]

但我们真正处理的只是量子系统与我们用来制备它的仪器之间的关系，以及之后量子系统与我们用来测量它的仪器的关系。

我们会用“这个态”和“那个态”的说法，融入前文介绍的实验和经验，来总结系统波函数的特征。罗韦利认为，我们假定这样的波函数一定有一个对应的物理描述，但这是错误的。波函数仅仅包含一些信息，令我们得以在确定的规则之下精确地预测测量结果。这些信息来自我们对系统以及制备系统的仪器设备的了解。为了利用这些信息，我们需要把它转换成与我们所要做的测量相对应的形式。换句话说，我们的关注点换成了制备好的系统以及测量仪器之间的关系。现在我们要做的是预测不同测量结果出现的概率。

本质上，罗韦利要表达的是，我们认为波函数是真实的，或者说它至少反映了系统背后的物理学性质，而这么想恰恰就错了。“因此，我们赋予一个系统（的波函数）……首先只是（该系统）此前发生的相互作用的结果的编码。”[注]量子理论的结构——它所包含的所有波函数和规则——就像是一种工具，可以帮助我们基于过去的事件预测未来的事件。[注]

这与玻尔的观点完全一致。玻尔曾用以下这段名言总结自己对量子

力学的观点：

所谓的量子世界并不存在，存在的只是一套抽象的量子物理描述。如果你认为物理学的任务是找出自然是什么样的，你就错了。物理学只关心我们能如何描述自然。㊟

我们顺带着还可以引用一段海森堡的著名言论：

这再次强调了对原子事件的描述中的主观因素。因为测量仪器是由观察者搭建的，我们不得不认识到，我们所观察到的并不是自然本身，而是自然在我们的测量手段下所暴露的那一面。㊟

让我们更进一步思考。我所读到的罗韦利关于量子力学的相关诠释强调，真实只由系统以及“执行测量”的设备之间的相互作用组成。就像宇宙中的一切事物一样，测量仪器也是由量子物体组成的。对于另一台测量仪器（另一位观察者）来说，得到结果是“上”还是“下”的这一举动根本就不是测量。如果我们假设第一台仪器有一根指针，在结果为“上”的时候指向左边，在结果为“下”的时候指向右边，那么第二位观察者只能认为原始的量子系统已经和第一台仪器纠缠在一起。在观察者去观察指针指向之前，要想正确地总结出原始量子系统与第一台仪器的信息，我们只能认为它们处于另一种叠加态：一个态代表量子系统状态为“上”，第一台仪器指针向左；另一个态代表量子系统状态为“下”，第一台仪器指针向右。

我们可以不断地增加测量仪器和观察者，这正是薛定谔在他著名的“薛定谔的猫”悖论中指出的关键问题。但罗韦利对此并不担心。如果实验设置的是指针指向左边代表猫死亡，那整个系统的信息就可以用“上×左×死”和“下×右×活”来概括。为了确定猫的状态，我们必须再引入一台仪器（或者是我和你），来打开盒盖观察。

我们会凭直觉认为：在我们打开盒盖之前，猫要么已经死了，要么

还活着。但罗韦利对此并不赞同。当然，在进行测量这一举动之前，我们可以猜测猫的物理状态，但我们不能否认这样一个简单的事实：在不与系统建立某种关系（比如打开盒盖观察）的情况下，我们不可能知道猫到底处于哪个状态。

我们的错误在于，认为叠加态代表了猫的物理状态——比如可怜的猫处在某种“炼狱”中，但其实叠加态只是关于我们对于这一系统能知道什么的信息总结而已。打开盒盖的举动并没有让波函数坍缩，把猫从炼狱拉进死的状态或者活的状态，它唯一改变的事情只是我们对系统信息的了解程度。“这种改变是非常自然的，出于同样的理由，每当我在报纸上看到一篇关于中国的文章，我对中国的了解就发生一次不连续的阶跃。”(注)

这样的逻辑可以轻易移植到与纠缠量子态相关的EPR情景中。假设我们的量子系统包含两个粒子，受某种守恒律的限制，如果一个粒子（我们称之为粒子A）处于“这个态”，另一个粒子（我们称之为粒子B）就必须处于“那个态”，反之亦然。根据前文，我们的测量仪器要将粒子的态转换为以“上”和“下”为基底的组合，而物理学定律限制了我们：如果测量到A粒子为“上”，那么B粒子就必须为“下”，反之亦然。

这两个粒子彼此分开，各自走了很长的一段距离，直到它们间的距离远到超越了因果接触的极限（物理作用的速度不能超过光速，如果在给定时间内连光都不能从一头传播到另一头，就可以说这两个物体之间的距离超越了因果接触的极限）。在一间实验室里，爱丽丝观察到粒子A的状态为“上”，因为她知道两个粒子的初始状态是如何制备的，她就能瞬间猜想到粒子B的状态一定为“下”。类似地，在另一间实验室里，鲍勃观察到粒子B的状态为“下”，也能猜想到粒子A的状态一定为“上”。如果要改变当前的状况，就需要爱丽丝和鲍勃互通信息，分享各自的测量结果，或者他们都把自己的测量结果与第三位观察者——查理共享，然后查理得出结论：两粒子确实是相关的，A粒子为“上”，B粒子

为“下”。

在这一系列的举动中，发生改变的是爱丽丝、鲍勃和查理三人能够获取的信息特点。当然，爱丽丝和鲍勃所记录下来并由查理建立的粒子相干结果，也只是表明了原始量子系统被制备出来的时候就已经编码于波函数里的信息。我们所做的事，只是用过去事件的信息来预测未来一系列事件的结果。

以上的说法听起来完全合理，甚至还会让我们感到一丝宽慰。接受了量子理论处理的仅仅是被编码的信息，以让我们通过过去预测未来这一点以后，我们又重新获得了局域性（即不存在“幽灵般的超距作用”），也无须引入波函数的坍缩了。我们无须解释系统是如何从充满了各种奇怪叠加态的微观量子尺度过渡到猫和人类观察者所在的宏观经典尺度的，因为并不存在这样的过渡。我们所做的一切，仅仅是通过一系列与系统的相互作用，追踪波函数里编码的信息，以建立我们对系统状态的认识而已——不管系统到底处于什么状态都是如此。

但罗韦利的相关诠释需要我们做出很大的让步，并为之付出高昂的代价。为了重新获得上述优势，我们需要改变对现实紧抓不放的态度。我们必须接受，问一个量子系统这样的问题——比如电子“究竟是什么”，或者是在不与它发生相互作用的情况下问它在某一个具体时刻处于哪个物理状态，都是没有意义的形而上学讨论。我们只能处理我们可以知道的信息，而我们可以知道的任何信息都来自相互作用以及经验。

罗韦利对波函数的这一诠释是相当经验主义的，或者说是反实在主义的。但他并不否定现实的存在。实际上，在罗韦利、斯莫林和我三人在几天内的一系列详细的邮件讨论中，罗韦利清楚地表现出了实在主义者的特征——他相信存在一个独立的客观实在，在其中“测量原则上来讲与其他任何一种物理相互作用都没有区别，而创造‘知识’的物理相互作用也没有什么特殊之处”。他只是认为，我们不应该把量子理论中常用的概念——尤其是波函数——从字面上诠释为真实存在的物理实体，

它们只是我们在讨论时所用的方便的表达方式而已，以便把过去与未来联系在一起。[注]

这种逻辑早就有人提出了。在1781年首次出版的《纯粹理性批判》中，伟大的德国哲学家伊曼纽尔·康德区分了两个概念：本体（noumena）和现象（phenomena）。他认为本体是实在或客观事物的物理对象，我们只能通过内心来设想它们；而经验性的现象则是事物在我们的感知和经验中表现出来的样子。[注]康德称，否定事物本身的存在是没有意义的，因为只有事物存在，它们才能在我们的感官知觉中出现（如果没有本体，就没有它所产生的现象了）。但同时，就算本体必然存在，我们原则上也不可能得到任何关于本体本身的知识。

对爱因斯坦来说，EPR实验的目的是展现出量子力学的不完备性。EPR论文的开头提出了物理实在的一个“有效定义”：

> 如果我们在不以任何方式干扰系统的情况下，以一定的确定性（如以一个归一化的概率）预测一个物理量的值，这一物理量中就存在着某种物理实在的元素。[注]

当然，这是一条富有哲学深意的陈述。[注]根据罗韦利的波函数相关诠释，在对物理实体（物体本身）的预测中，无论确定性有多大，都不能改变这样一个事实：系统只有经过某种相互作用，并获得与该种相互作用相关的性质（即变成了物体的表象）之后，才能变成经验现实的一部分。实际上，根据这种逻辑，“不以任何方式干扰系统”和“物理（经验）实在的元素”就是互斥的。为了变成经验实在的一部分，系统必须受到某种相互作用。

我思考并写作量子力学相关的内容已经有25年了。我可以告诉你，量子力学的相关诠释是我所遇到的原始哥本哈根观点的最清晰的表述，它比玻尔自己关于该话题的许多说法都清晰得多。玻尔的表述总是含糊

不清，而且总是依赖在微观量子世界和我们做出测量行为的经典世界之间划清界限，这有时会被约翰·贝尔称为“狡诈的划分”。[注]

但相关诠释仍然让很多理论物理学家（以及大多数实验物理学家）深感不安。它的逻辑无可指摘，但它的表述就是物理系统沿着一系列的相互作用传递信息，这很难让我们感到满意。这一理论结构无法回答我们看似非常合理的问题：大自然究竟是怎么做到的呢？这一诠释就像发生惨痛的交通事故之后，事故现场的急救人员不停地告诉我们：“快走快走，这里没有什么好看的。”有人认为，哥本哈根诠释就是告诉我们这类问题没有意义，我们应该“闭上嘴，只管算”。[注]罗韦利同意这一观点：

我认为，我们不应该一遍又一遍地问同一个问题了，不需要尝试用我们关于连续物体的经典直觉来填补大自然本身离散的量子本质。[注]

我要澄清一点：我们不是要反驳康德的观点，没有人说我们期望掌握关于量子物体本身的知识。但通过相互作用，量子物体在我们的经验实在中留下了投影。很少有人会认为我们甚至连关于量子物体表象的新知识都无法获得——如果这样的话我们就走到科学的尽头了，还不至于。

相关诠释认为，我们不应该从字面意义上理解量子理论的概念和结构，认为在没有相互作用的情况下它们就能代表量子系统的真正状态。也许这些概念和结构确实不能代表量子系统的真正状态，但它们仍然给我们透露了某种信息。而且，正是在科学家探索现实的过程中（通常就是在从字面意义上理解这些概念和结构的过程中），我们才发现还有很多事情有待了解。

但我们也不要有不切实际的期望。我们所面临的选择是一个哲学上的选择，并不比寻求真相更简单。爱因斯坦曾经承认：“我相信现实是理性的，也相信它在某种程度上是人类推理所能触及的，对于这种坚

信，我只能用‘虔诚’这个词来描述。”[注]

关于波函数，我们可以接受一种反实在主义的诠释，也可以接受一种相对而言更实在论的观点，认为量子理论的概念和结构多少包含了一些字面上的物理含义。而对于实在论，我们也要付出一定代价，代价就是我们会不可避免地被拖入一场“理论的游戏”[注]。如果纯粹的经验主义是锡拉岩礁，对现实本质无穷无尽的形而上无意义思考是卡律布狄斯旋涡，在两者之间玩一场“理论的游戏”，即找到合适的理论，就像是要安全渡过中间的墨西拿海峡。[注]这意味着我们要不可避免地思考关于现实本质自身的问题。在这么做的过程中，我们可能会走入歧途（我认为多世界诠释与意识诠释的倡导者就已经走入歧途了），但我想人类探求真相的本性必定会驱使我们去尝试探求现实本质的。

也许正如奥德赛所做的那样，冒着失去几位船员的风险靠近锡拉岩礁，比冒着失去整艘船的风险靠近卡律布狄斯旋涡强。如果我们要发现新的东西，我们的思考就必须与事物表象的经验事实相关联，毕竟，这是科学的必备要素。

字面地看待量子理论的概念与结构，意味着认为波函数的概念确实告诉了我们背后的某种物理机制，并逼迫着我们思考量子概率、量子测量的本质、非局域性，以及如何将具有叠加态的量子世界与我们直接感受到的经典世界划分开的问题。如果我们准备好做这件事了，那么我认为我们别无选择，只能接受量子力学显然是不完备的。然后，问题就变成了：它应该是完备的吗？我们怎么能把它变成完备的呢？

爱因斯坦、波多尔斯基和罗森在他们影响深远的论文的结尾评论道：“关于这样一个（完备的）描述是否存在，我们留待后人得出结论。但我们相信，这样的理论是可能存在的。”[注]爱因斯坦自己在1927年短暂地涉猎过隐变量理论，但觉得这一方法“过于廉价”[注]遂弃之。或许他认为，只有在一套深奥的大统一理论中才能找到这一问题的解法。

换句话说，也许将引力纳入考虑范围能够解决量子理论中的基础性问题。

但具体要怎么做呢？彭罗斯长时间以来一直都认为，要让量子力学变成一个完备的理论，我们就必须从物理学上解释多个可能的测量结果坍缩到一个实际测量结果的过程，他称其为“客观崩现”(注)（objective reduction）。在《皇帝新脑》（*The Emperor’s New Mind*）中，他提出，一个正确的量子引力理论可能可以解决这个问题，因为坍缩可能是时空弯曲产生的一种引力效应：

我自己的观点是，只要引入“显著”的时空弯曲，量子力学的线性叠加规则就会瞬间失效。多个可能出现的态的复振幅的叠加被一个按权重分配概率的实际态代替，而其中的一个态最终会真正出现。(注)

在《皇帝新脑》出版26年之后，彭罗斯出版了新书《时尚、信仰与幻想》（*Fashion,Faith and Fantasy*）。在新书中，他的观点并没有改变，但关于量子坍缩的机制，他在逻辑上做了一些修正。他如今认为，是引力在叠加态的各个成分中作用的程度不一样，才导致叠加态坍缩成其中一个可能的结果。从这个意义上说，引力场提供了某种“摩擦阻力”，导致了退相干（decoherence）的发生。“退相干”是德国理论物理学家迪特尔·策（Dieter Zeh）于1970年首次提出的概念，指叠加态的各个成分不再同步行进而导致叠加态消失的现象。(注)

所有的质能都会产生引力场，因此任何大小达到经典尺度的测量仪器都会累积足够的相互作用，确保坍缩的发生。而且，虽然纠缠叠加态可以在实验室中产生，甚至可以越过很长的距离传输，(注)但它们仍然是很脆弱的，很容易就会被破坏。测量的结果在相互作用链的很早一端就已经被决定了，远远先于它传播到猫（或是格温妮丝·帕特洛）的时候。彭罗斯认为，引力诱导坍缩的时间尺度或许能允许实验很快捕捉到坍缩的过程。

不过，哪怕实验捕捉到了坍缩的过程，还有很多事情等待着我们解释。虽然部分理解了臭名昭著的坍缩如何发生是件好事，但我们还需要思考实际的测量结果是如何从各种各样的可能性中被“挑选”出来的。约翰·贝尔相对来说对此没那么感兴趣：“相干性以这种方式或那种方式消失，‘与’变成‘或’，是尝试解决‘测量问题’的人经常讨论的问题。我也一直为此困惑。”(注)

总结出坍缩过程中所包含的问题是一件事，但如果我们要为量子力学本质上的非局域性找到一个确定性的解，则是另一件事了。高精度的实验已经证明，相距极远的纠缠粒子之间也存在着关联，它们之间的距离远远超过以光速运行的信号能达到的范围。如果波函数坍缩，粒子A指向“上”，粒子B如何在无法被施加给A的作用所影响的情况下瞬间采取“下”的状态呢？

看起来我们别无选择，只能借助某种形式的隐变量的帮助。但我们知道，所有关于贝尔和莱格特不等式的实验结果都表明，就算隐变量存在，它们也只能是非局域性的，就像量子理论本身一样是“幽灵般的”（用爱因斯坦的话说则是“太廉价了”）。

但是，请等一等。

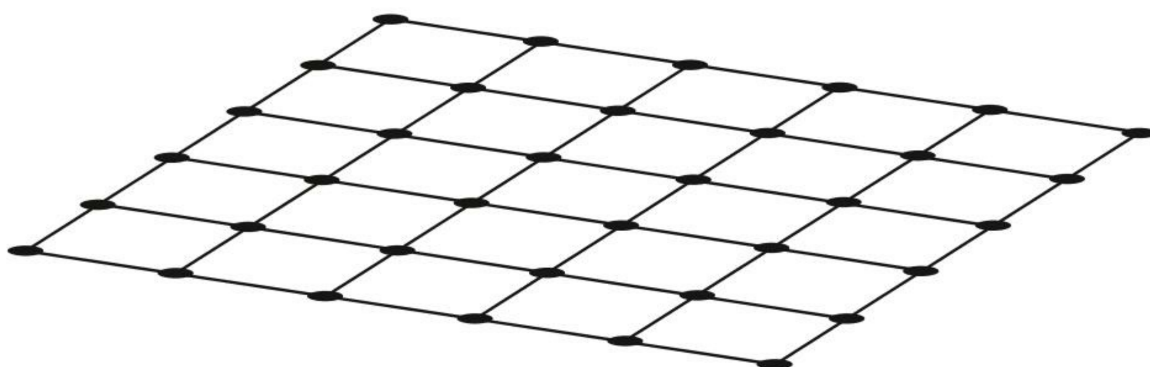
在一个连时空本身都是演生出来的量子引力理论中，还存在局域性吗？当然，当我们认为某个东西是局域性的时候，我们认为它就在“这里”，被限制在空间中的一个小区域里。在圈量子引力的背景下，这样一个区域可能由自旋泡沫中演生出来的动态格点里一组相邻的点来定义。但是，在这一格点之下，是一套由节点和连接组成的自旋网络。在此前的章节中我们知道了，这种网络可能可以描述费米子的传播与相互作用，那在这一背景之下，“局域性”意味着什么呢？

这么看起来，我们似乎有了两种局域性的概念。马科普洛和斯莫林解释道：

基础理论中的（自旋网络）图中有一种局域性的概念：如果两个节点在图中相连，我们就称它们是相邻的。但在低能极限下（这种情况下节点变为坐标位置），图中还嵌入了另外一种局域性的概念：如果两个粒子（嵌在图中的两个节点处）在时空度规上是相近的，我们也称它们是相邻的。[注]

在圈量子引力理论中，节点（体积量子的位置）与演生时空中的位置或格点对应（通过上段引文中提到的“嵌入”这种方式）。如果这种对应是有序的，即在自旋网络中相连的相邻节点在演生空间中所对应的位置也是相邻的，我们就得到图24（a）中的规律晶格，粒子以“跳格子”的方式从一个位置跳往下一个位置，因此在时空中粒子要想跨越遥远的距离需要花费一定的时间，这解释了为什么光速是有限的。

但节点到空间位置的对应不一定是有序的。美国理论物理学家默里·盖尔曼曾经说，在量子力学中，“任何没有被禁止的事情都是会强制性发生的”[注]。而圈量子引力理论中，相邻的节点也会被转换到不相邻的空间位置，如图24（b）所示。这里的“不相邻”有可能意味着相隔半个宇宙之远。当然，这类非局域性的连接不可能太多，不然我们可能早就注意到（也许是痛苦地注意到）它们了。[注]“不过，横跨宇宙的非局域性连接还是很常见的，”斯莫林提出，“平均而言，每一立方纳米的空间中就有超过一个这样的连接。”[注]



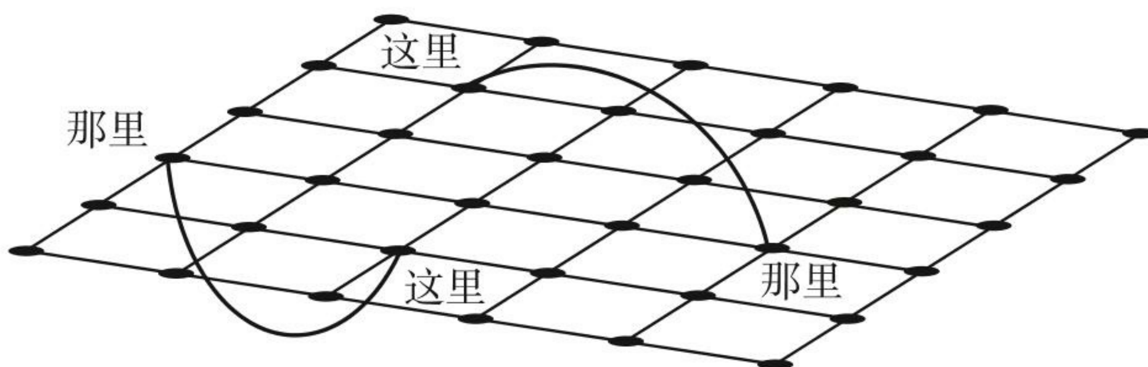


图24 在圈量子引力理论中，自旋网络图中的节点会对应演生空间中的位置或格点。如果这一对应是有序的，就会产生一套有序的晶格，如图（a）所示。但这一对应不一定是有序的：相邻节点间的连接可能被转换为不相邻时空位置间的连接，如图（b）所示，称为“无序的局域性”

前一章中我们提到，罗韦利与同事在为费米子建模的过程中注意到，费米子圈有时候会表现出非局域性：它会从一个位置消失，又在另一个遥远的位置出现。斯莫林和马科普洛把这一现象叫作“无序的局域性”。

即便这种无序的局域性真的存在，我们也很难在实验室中探测到其效应。尽管简单的概率估算表明宇宙中非局域性连接的数量可能和宇宙

中重子的数量差不多，但在地球上的任意一间实验室中，这样的连接最有可能通往我们星系之外的一个随机的点。[注]我们根本无法辨认它通往哪里。

但这类非局域性的连接有没有可能就是最终的隐变量呢？我们称一对纠缠粒子由同一个波函数所描述的时候，它们会不会是通过背后的自旋网络中的一条连接相连的呢？在粒子沿着自旋泡沫传播并在时空中相互分离的时候，这样一条连接仍然存在。也许就是这样的连接，在我们观测到粒子A为“上”的时候，像穿过某种秘密通道一样在时空中迅速传递，让粒子B具有了“下”的状态。在我们为了粒子之间如何超光速跨越时空交流而想破脑袋的时候，它们其实在时空之下保持着因果联系。

我们倾向于认为，在量子引力理论中，量子的性质和行为是第一位的，而时空和广义相对论是在低能近似（即低能极限）下演生出来的二级现象。换句话说，我们假设量子引力理论首先是一个量子理论。但如果我们将非局域性作为量子物体的一项基本特征或行为，那么从上面的讨论中我们可以看到，从某种意义上说，量子理论本身也是基于量子的性质和行为演生出来的二级理论。

或许圈量子引力理论向我们提示了一个非常激进的想法：有可能存在这么一个理论，一切都是从一套抽象的相互作用中演生出来的——不管是量子性质，是物质与辐射的行为，还是时空（即引力场），都是如此。马科普洛与斯莫林在2003年表明，背景无关的模型在同样的低能极限下导出非相对论性的量子理论以及时空是可能的，此后斯莫林还一直在沿着这一想法继续探究。

---

1. Carlo Rovelli,personal communication,27 July 2017.
2. Lee Smolin,personal communication,27 July 2017.
3. 关于常识中到底包含了哪些内容，我没有听说过有什么广泛认同的定义。前文把广义相对论归为经典（非量子）物理学，但对大多数人而言广义相对论远远超出了常识的范围。我在这里所说的“常识”，指的是大家在日常经验中熟悉的经典物理的逻辑结构。这

件事在那件事之后发生，而当一件事发生时，我们可以以始终如一的可预测性和确定性预测另一件事的发生。经典的物体是局域性的，不会形成诡异的叠加态。哪怕我们不观察它们，它们也一直保持着我们指派给它们的性质。

4. 一种致幻剂。——编者注

5. Carlo Rovelli,quoted by Bryan Appleyard,‘Physics Made Easy’,Sunday Times Magazine,11 June 2017,p.16.

6. Carlo Rovelli,personal communication,21 June 2017.

7. Lee Smolin,personal communication,21 June 2017.

8. This is the ‘principle of superposition’—for all linear systems,the result of combining two effects is simply the sum of these effects.The principle forms the basis of Fourier analysis (named for nineteenth-century French mathematician and physicist Joseph Fourier),in which a complex physical effect can be modeled as the linear combination of a series of simple sine waves,called a Fourier series.

9. For the avoidance of doubt,we actually take the modulus-square of these contributions,because in quantum mechanics they may be imaginary (i.e.they may contain the factor i,or$\sqrt{-1}$).For example,if the actual contribution is ‘a bit×i’ (ibit),then the corresponding quantum probability is $|ibit|^2=|(ibit)\times(-ibit)|=bit^2$.

10. Carlo Rovelli,‘Space is Blue and Birds Fly Through It’,arXiv:physics.hist-ph/1712.02894v2,14 December 2017,p.1.

11. 为了避免给读者造成混淆，我在这里继续用了“波函数”这个词。

12. Matteo Smerlak and Carlo Rovelli,‘Relational EPR’,Foundations of Physics,37 (2007),427–45; arXiv:quant-ph/0604064v3,4 March 2007,p.3.The italics are mine.

13. 只要稍微思考一下，你就会意识到这种工具主义者的逻辑并不仅限于量子理论，经典物理学的理论可以用同一种方式来诠释。

14. Niels Bohr,quoted by Aage Petersen,‘The Philosophy of Niels Bohr’,Bulletin of the Atomic Scientists,19 (1963),12.

15. Werner Heisenberg,Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science,Penguin,London,1989 (first published 1958),pp.45–6

16. Smerlak and Rovelli,‘Relational EPR’,p.5.

17. The word ‘information’ has two meanings.In this description I’m using an operational interpretation of information,as the summary of what we know about a physical system.Rovelli’s relational interpretation of quantum mechanics is actually based on the information content inherent in physical systems by virtue of the properties established by physical relationships.The two meanings are,of course,inter-related: we can’t acquire operational information unless it is

inherent in the systems we’re studying.Rovelli explains it this way: ‘I am a naturalist: I see “knowledge” as embodied in the world and not the other way around,not in terms of the world as the content of my knowledge.Of course this other foundation is viable,I just think it is less productive: I prefer to keep reminding myself that our access to the world is limited,but I accept only a worldview in which me and my knowledge are a very special case of the world and its physical correlations.’ Carlo Rovelli,personal communication,1 August 2017.

18. 这并不意味着本体只是我们用丰富的想象力凭空臆造出来的产物。我可以想象各种各样的东西，比如独角兽，但显然独角兽并不存在于我们的经验现实当中。在我们当前讨论的上下文中，本体指的是像电子这样的物体。在我们的经验现实中，我们可以通过多种方法让电子展现出它们自身的性质，但在没有任何相互作用可以让电子呈现出自身性质的情况下，电子本身只存在于我们的头脑中。

19. Albert Einstein,Boris Podolsky,and Nathan Rosen,‘Can QuantumMechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?’,Physical Review,47,(1935),777–80.This paper is reproduced in John Archibald Wheeler and Wojciech Hubert Zurek (eds),Quantum Theory and Measurement,Princeton University Press,Princeton,NJ,1983,pp.138–41.This quote appears on p.138.

20. 为了对爱因斯坦公平起见，需要指出EPR论文基本上是鲍里斯·波多尔斯基写的，几乎完全偏离了爱因斯坦的原意。爱因斯坦并不认可这个定义，因为他知道它对于论证量子力学的不完备性并不是必要的，还会留下一个易于被对手抓住以用来攻击的弱点。

21. See Andrew Whitaker,John Stewart Bell and Twentieth-Century Physics:Vision and Integrity,Oxford University Press,Oxford,2016,p.57.

22. This phrase is frequently attributed to Feynman,but it appears to have been coined by N.David Mermin,see ‘Could Feynman Have Said This?’,Physics Today,May 2004,pp.10–11.

23. Carlo Rovelli,‘Space is Blue and Birds Fly through It’,arXiv:physics.hist-ph/1712.02894v2,14 December 2017,p.7.

24. Albert Einstein,quoted in Maurice Solovine,Albert Einstein: Lettres à Maurice Solovine,Gauthier-Villars,Paris,1956.This quote is reproduced in Arthur Fine,The Shaky Game: Einstein,Realism and the Quantum Theory,2nd edition,University of Chicago Press,Chicago,1986,p.110.

25. 这个说法来自乔治·R.R.马丁的著名畅销奇幻小说《冰与火之歌》改编而成的电视剧《权力的游戏》（Game of Thrones ）。

26. 亚平宁半岛与西西里岛之间的海峡为墨西拿海峡。墨西拿海峡在位于亚平宁半岛一侧有一块危险的巨岩，称为锡拉岩礁，而在西西里岛一侧则有一个大旋涡，称为卡律布狄斯旋涡。由于墨西拿海峡极其狭窄，在海峡中行驶的船只要么可能碰到锡拉岩礁，要么可能被卷入卡律布狄斯旋涡。荷马史诗中关于锡拉女妖、卡律布狄斯海妖的传说很可能就是得灵感于墨西拿海峡的礁石、激流与旋涡。——译者注

27. Einstein,Podolsky,and Rosen,‘Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?’,in Wheeler and Zurek (eds),Quantum Theory and Measurement,p.141.

28. 波函数坍缩有时也被称为“态矢量崩现”，虽然术语不一样，但它们表达的意思（以及问题的本质）是一样的。

29. In a letter to Max Born dated 12 May 1952,Einstein wrote: ‘Have you noticed that Bohm believes (as de Broglie did,by the way,25 years ago) that he is able to interpret the quantum theory in deterministic terms? That way seems too cheap to me.’ Einstein is referring to the de Broglie–Bohm ‘pilot wave’ interpretation of quantum theory,which is essentially a non-local hidden variables theory.This letter is reproduced in Max Born,The Born–Einstein Letters,Macmillan,New York,1971,p.192.

30. Roger Penrose,The Emperor’s New Mind: Concerning Computers,Minds and the Laws of Physics,Vintage,London,1990,p.475.

31. Penrose wrote: ‘In many standard situations of quantum measurement,the main mass displacements would occur in the environment,entangled with the measuring device,and in this way the conventional “environmental decoherence” viewpoint may acquire a consistent ontology.’ See Roger Penrose,Fashion,Faith and Fantasy in the New Physics of the Universe,Princeton University Press,Princeton,2016,p.215.

32. 2017年6月，中国科学家成功从地球上空500千米处的通信卫星上，将一对纠缠光子分发到地球表面相距1 200 千米的两个基站。

33. John Bell,‘Against Measurement’,Physics World,3 (1990),36.

34. Fotini Markopoulou and Lee Smolin,‘Quantum Theory from Quantum Gravity’,Physical Review D,70 (2003); arXiv:grqc/0311059v2,14 June 2004.

35. Murray Gell-Mann,Nuovo Cimento,Suppl.2,4,Series X (1958),848–66.In a footnote on p.859,he writes that ‘any process not forbidden by a conservation law actually does take place with appreciable probability.We have made liberal and tacit use of this assumption,which is related to the state of affairs that is said to prevail in a perfect totalitarian state.Anything that is not compulsory is forbidden.’ He was paraphrasing Terence Hanbury (T.H.) White,the author of The Once and Future King.

36. 而且，如果存在太多非局域性连接，就不可能演生出看起来连续的空间了。

37. Lee Smolin,Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe,Penguin Books,London,2014,p.182.

38. See Fotini Markopoulou and Lee Smolin,‘Disordered Locality in Loop Quantum Gravity States’,Classical and Quantum Gravity,24(2007),3813–24; arXiv:gr-qc/0702044v2,21 April 2007,p.11.

第14章 如果宇宙并非起源于大爆炸

我在第11章中提到，在李·斯莫林离开宾夕法尼亚州立大学、卡洛·罗韦利回到欧洲之后，阿什特卡的兴趣更多地转向了黑洞物理学和宇宙学。他对该领域的兴趣起源于经典理论，但后来他不可避免地开始思考如何将圈量子引力理论带来的新的时空描述应用在黑洞物理学与宇宙学上。

前文提过，爱因斯坦发现他可以将广义相对论用在整个宇宙上（他自己调侃说这个想法会让他被关进疯人院）。根据暴胀大爆炸宇宙学的标准模型，宇宙“开始”于我们如今认为发生在138亿年前的一场热大爆炸，空间、时间和能量都通过这场爆炸产生。大爆炸理论的支持者认为，为了解释宇宙的平直性问题和视界问题，我们可以引入暴胀模型，假设宇宙在大爆炸之后的10^{-35}到10^{-32}秒之间发生了一场短暂的指数级剧烈膨胀。物理学家认为，这样急剧的膨胀将暴胀子场中的量子涨落印刻到了更大的宇宙结构中，并以细微的温度变化的形式留下了痕迹，这就是我们如今可以检测到的宇宙背景辐射。

前文也指出，这一模型还没能解决一切问题。为了完善模型，我们需要加入两个很重要又很神秘的量，它们加起来组成了宇宙中总质能的95%之多：暗物质与暗能量。暗能量以一个小的、正的宇宙学常数的形式存在，它解释了我们如今探测到的宇宙膨胀的加速现象。

从某方面来说，大爆炸模型是极其成功的。只需要6个参数，我们就能把大量且多种多样的宇宙学观测现象统一成一个整体。但另一方面，这个模型又是极其令人失望的：它的大部分内容都是我们不能解释的，而且我们也不能把理论应用于宇宙诞生之初，因为在大爆炸发生的一瞬间，它就完全失效了，也就是说在这个时间点所有已知的物理学定

律都突然不起作用了。

这是因为广义相对论是一项经典（非量子）理论，它容许物体处于从无穷大到无穷小之间的任何尺度。在大爆炸背景下，无穷小的尺度表现为奇点。奇点的质能密度无穷大，相当于整个宇宙都被压缩成这个无穷小的点。从某种程度上说，奇点的存在让物理学家十分尴尬。

而且看起来，我们还没有什么办法能轻易摆脱这种尴尬。有些理论物理学家认为，奇点之所以会出现，是因为我们求解爱因斯坦引力场方程所用的时空度规对称性太高了，如果我们在对称性较低的情况下求解，奇点就会消失。不过，1970年，彭罗斯在英国剑桥大学与当时还年轻的史蒂芬·霍金推导出了一系列奇点定理，他们的工作表明，在任何情况下，把广义相对论用在质能密度与时空曲率极高的地方，都会不可避免地产生奇点。

大爆炸奇点的预测结果表明，关于一切事物的起源，我们甚至都不能提出完全合理的迫在眉睫的问题，更别说回答问题了。[注]

而这只是一系列棘手问题的开始。宇宙暴胀解释了平直性问题和视界问题，但没能解决暴胀前的初始条件如何，以及要形成我们如今观察到的宇宙需要多长时间的暴胀的问题。它解决了关于精细调节的一个问题，但又留给我们另一个问题。有些理论物理学家认为，普朗克卫星提供的关于宇宙背景辐射的最新数据并不支持最简单的“慢滚”近似暴胀模型。[注]而且，如今的理论也没能解释为什么宇宙学常数是我们所观测到的这个值。

我们一个问题一个问题地解释。

20世纪90年代末，圈量子引力开始作为一种较为一致、令人满意的量子引力理论出现。阿什特卡意识到，它可能可以帮助我们理解宇宙演化的最早期阶段发生了什么，特别是大爆炸奇点问题。他解释道：“大

爆炸是广义相对论在它不适用的范围内所做出的预测。”[注]

霍金此前已经意识到广义相对论是一个不完备的理论。他在《时间简史》中写道：

> 然而，广义相对论宣称自己只是一个部分理论，所以奇点定理真正显示的是，在极早期宇宙中一定有过一个时刻，那时宇宙是如此之小，以至于人们不能再忽略20世纪另一个伟大的部分理论——量子力学的小尺度效应。[注][注]

量子几何动力学的早期版本与惠勒-德威特方程并没有为研究这个问题提供有用的新方法。霍金相信，在完全成熟的量子引力理论中，奇点应该会消失，但1988年的他尚不确定这类理论应当如何构建。

这一问题被悬置了11年。随后，德国北莱茵-威斯特伐利亚州的亚琛大学有一名年轻的博士生马丁·博约瓦尔德发表了两篇论文，带动了这一领域的进展。这两篇论文技术性很强，但它们表明基于圈量子引力建立起量子宇宙理论是有可能的。

这一进展令人激动。每个人脑海深处都有这么一个简单的问题：圈量子引力中的离散空间量子能完全消除大爆炸奇点吗？如果可以，圈量子宇宙学（loop quantum cosmology，LQC）或许就能一直到“零时刻”仍然适用。

博约瓦尔德在2000年获得了博士学位，阿什特卡和斯莫林安排他来到宾夕法尼亚州立大学做博士后。博约瓦尔德开始着手认真研究这一课题。他所面临的问题很容易表述：在量子几何学中，经典宇宙学在（大爆炸）奇点处发生了什么？[注]但问题的答案就没有这么简单直接了。回答它需要引入几条假设和一些数学操作，不过博约瓦尔德得到的答案已经足以让他自己满意了：“对于小体积而言，量子几何学带来了新的效应，这些效应有助于消除经典理论中的奇点。”[注]

阿什特卡赞赏了他的工作。“这一工作很了不起，”罗韦利说，“每个人都希望一旦我们学会正确地用理论描述量子宇宙，奇点就消失。但这件事此前从未真的发生过。”㊟

圈量子理论取得了一定的成果，但路途还远谈不上一帆风顺。

从第5章中我们知道，爱因斯坦的引力场方程可以得出精确解，每个解都代表一个不同的时空度规。在宇宙学的背景下，这些解可以用“宇宙标度因子”表示出来，这是一个无量纲常量，通常用a表示。我们可以把它理解成“某个合适的距离”（比如两个星系之间的距离）在时刻t的大小除以它在之前的一个固定的时刻t0时的大小。在膨胀的宇宙中，这个距离会随着时间推移而增加（见第5章的图13）。星系间的距离会越来越远，因为它们所在的时空在不断膨胀。因此，标度因子a是与时间相关的。

如果宇宙以一个恒定的速率一直膨胀下去，其标度因子就应该随着时间线性增加，这正是哈勃定律的内容：星系远离我们的速度，与它和我们的距离成正比。㊟

哈勃定律中的比例常数被称为哈勃参数（H）。它等于a随时间的变化率（通常用$\dot{a}$来表示）再除以a。我们可以将$\dot{a}$看成膨胀或收缩的速度。在膨胀速率恒定的宇宙中，$\dot{a}$是固定的，而且大于零。在收缩速率恒定的宇宙中，$\dot{a}$是固定的，而且小于零。

然而，我们已经观测到，虽然我们的宇宙正在膨胀，但膨胀的速率并非恒定——膨胀速率$\dot{a}$自己也在随着时间而增大，也就是说我们的宇宙在加速膨胀。这意味着，哈勃参数并非常数，它会随着时间变化。我们所说的哈勃常数H_0，就是哈勃参数今天所取的值。㊟

理论物理学家很快意识到，博约瓦尔德得出的早期的圈量子引力解在哈勃参数方面会产生一些很不符合物理实际的可能结果。然而，学界

对于将圈量子引力的技巧更系统性地应用于宇宙学理论框架中的兴趣与日俱增。阿什特卡与博约瓦尔德、耶日·莱万多夫斯基、帕拉姆普雷特·辛格（Parampreet Singh）、托马什·帕夫洛夫斯基（Tomasz Pawlowski）和亚历杭德罗·科里基等人合作，推导出了更为细致而复杂的模型。

辛格和帕夫洛夫斯基发展出一套完整的数学与概念结构，并用计算机模拟得出了数值解。这些模拟既可以沿着时间正向进行，也可以反向进行。他们想知道宇宙在传说中的奇点附近会发生什么，于是沿时间反向运行了程序，看着时空如何收缩，发生一场“大挤压”（big crunch）。阿什特卡对他们见到的现象十分震惊。

反向运行的宇宙的表现基本符合预期，但它在接近极高密度的状态时，并没有坍缩成一个奇点，而是反过来开始膨胀了。

宇宙反弹了。

不过，这一模型也存在其他问题。本来，在瞥见对奇点问题的非凡解决办法之后，阿什特卡被这些问题弄得灰心丧气，但在辛格与帕夫洛夫斯基的鼓励下，他还是坚持把这一研究推进下去了。更仔细的检查表明，这一模型有三个不符合物理现象的特征。阿什特卡后来说道：

更深入地思考以后，我意识到，我们有意无意地将圈量子引力理论中的量子几何想法用在了一个背景的参考度规上，而没有用在物理度规上。在我们重新将它们应用到物理度规上之后，三个问题全都同时迎刃而解了。[注]

在重新构建模型的过程中，阿什特卡等人改变了视角，将关注点从面积转到体积上。通过这种方法，圈量子宇宙学理论在大约6年的时间里经历了4个发展阶段，理论物理学家最终满意地看到，该模型的结构与物理现象比较相容了。好消息是，用圈量子引力理论重新构建的宇宙

学理论仍然能消除大爆炸奇点，在这些模型中，大爆炸被“大反弹”（big bounce）所代替（如图25所示）。

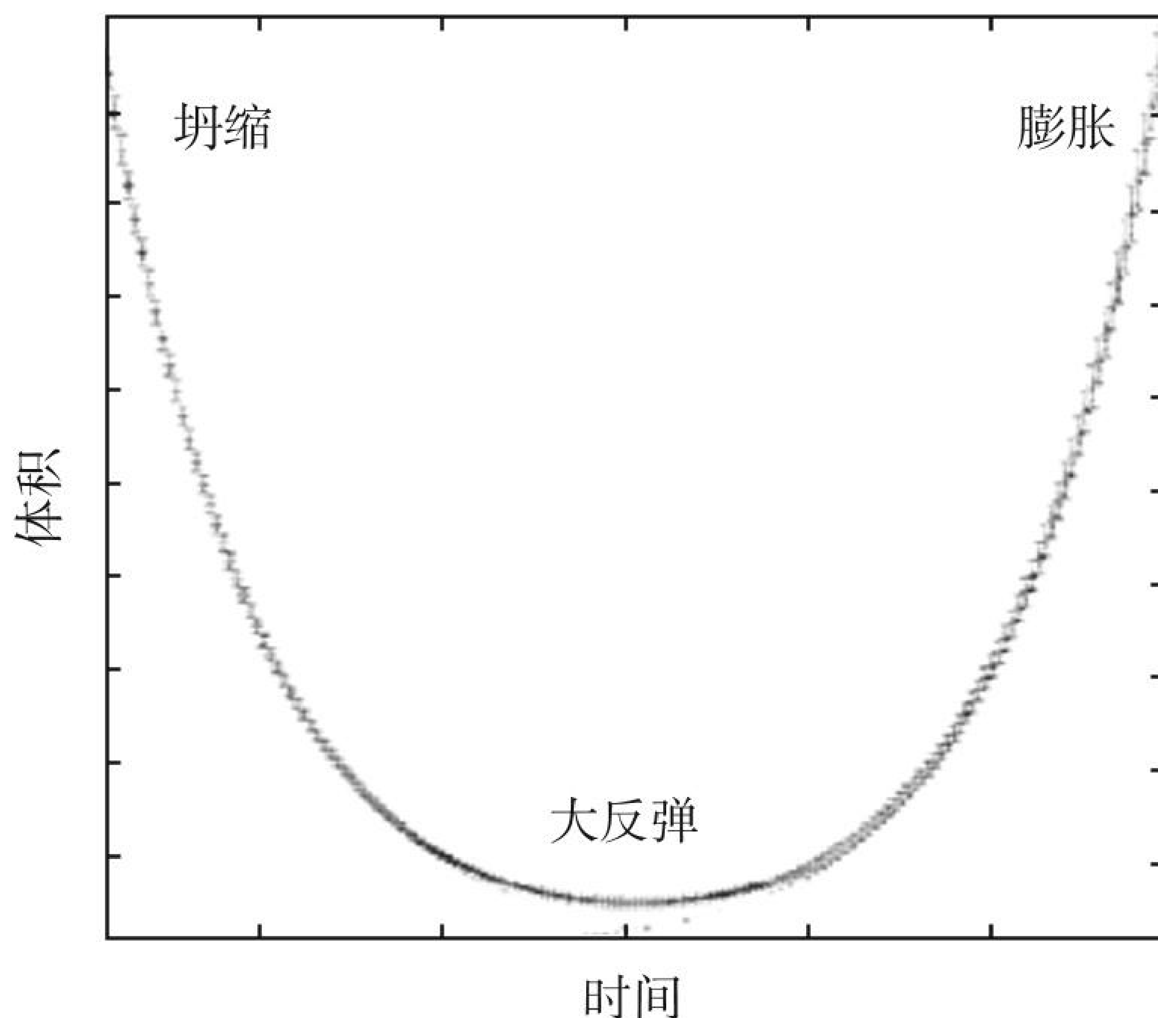


图25　在圈量子宇宙学中，基本面积和体积量子的存在意味着可以避免大爆炸奇点的出现。在宇宙坍缩的过程中，它的体积逐渐减小（图左侧），但当它的密度达到一个临界密度时（图中间），宇宙会“反弹”回来，再次开始膨胀

与纯量子版本的圈量子宇宙学相比，一种所谓的“半经典”近似可以帮我们更容易地理解大反弹的起源和本质。在这种近似形式下，量子几何产生的效应被视为对经典广义相对论的修正。科里基解释道：“这一模型给了我们很大的力量，让我们可以提出这么多问题，并且得到精确的答案。”[注]他得到的圈量子宇宙学解看起来与广义相对论在熟悉的时空度规中得到的解十分相似。[注]半经典近似理论只增加了一个量子修正

项，为$-\rho/\rho_C$，其中ρ是宇宙中质能的密度，ρ_C则是反弹发生时的临界密度。这一项中的负号是很重要的。在收缩的宇宙中，a小于零，当质能密度接近临界密度时，ρ/ρ_C等于1，方程中的各项互相抵消，a变成零。在这时候，宇宙就会停止收缩。

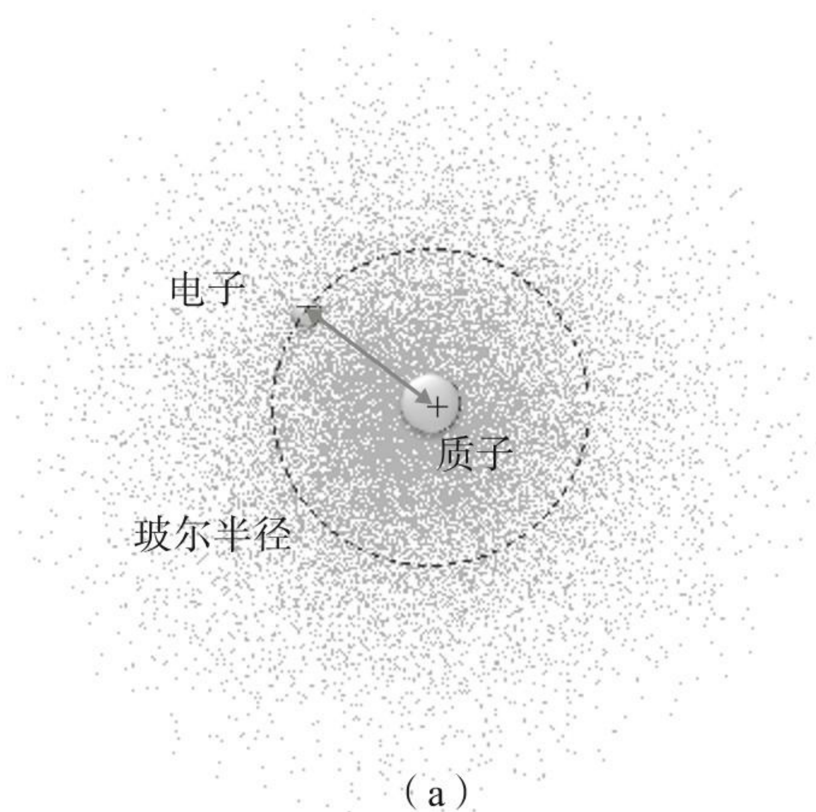
临界密度ρ_C与普朗克密度（大约为5.0×10^{96}千克每立方米）有密不可分的关系。[注]这个密度大得无法想象：太阳中心的密度只有1.6×10^{5}千克每立方米，要达到普朗克密度，我们需要把10^{12}个太阳压缩到一个质子中。这个密度的确很大，但并不是无穷大。体积量子的存在，让宇宙不至于坍缩到高于普朗克密度的密度。量子力学不允许宇宙到达奇点。

为了理解这是为什么，我们需要学习一点儿亚原子物理的知识。一个氢原子包含一个带正电的质子（原子核）和一个带负电的电子。薛定谔在1925年发现，量子力学描述下氢原子中电子的最低能级态（或者说轨道）可以由一个球面波函数表示，质子位于它的正中间。我们可以用这个波函数得出电子最有可能出现在原子中的哪个位置，结果是离质子5.29×10^{-11}米的位置，这个距离被称为玻尔半径，如图26（a）所示。注意我们用的词是“最有可能”。地球以约1.5亿千米的半径绕着太阳转，但在量子力学中，电子的轨道并不是以质子为中心、半径固定的圆形，而是散布在与中心距离不等的一系列位置，反映电子的波动本质。电子分布的概率在玻尔半径处达到最大值，如图26（b）所示。

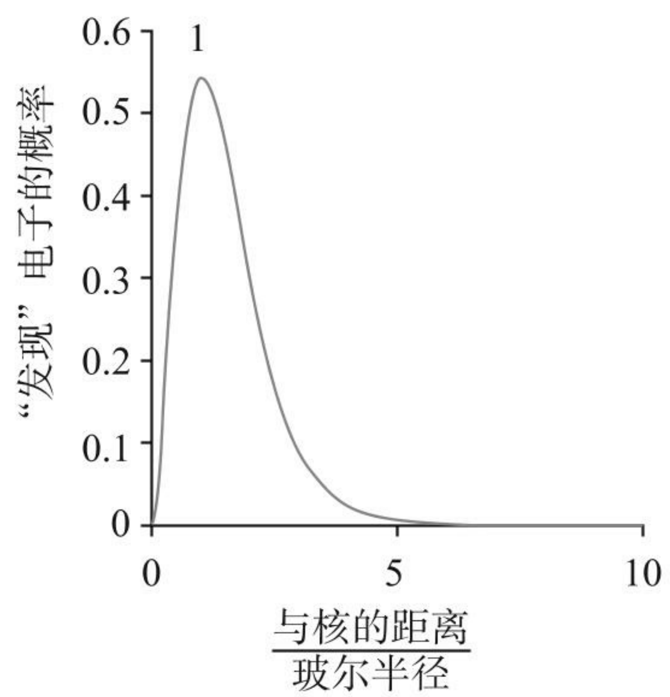
这张图可能会引起各方面的疑惑，但我们首先会想到，异性电荷相吸，而且带异性电荷的物体之间距离越近时吸引力越大。那为什么这团带负电的波函数没有直接坍缩，然后与质子相结合呢？如果波函数围绕质子坍缩了，倒不会产生奇点，但这种情况的灾难性后果也不亚于奇点：如果原子不能稳定存在，那宇宙中任何物体都不存在了。

事实表明，海森堡不确定性原理为电子波函数所占的最小空间范围

设置了一个严格的极限。如果我们尝试把电子压缩到质子周围越来越小的空间里，也就是说使它的位置越来越精确，那我们对电子动量的测量结果就会更加不确定。波函数仿佛会“反弹”，施加一种排斥力，阻止它被进一步压缩。当然，不确定性原理依赖于普朗克常数h，它尽管很小，却终究不是零。而圈量子引力和圈量子宇宙学中的面积量子和体积量子——分别正比于普朗克长度的平方和立方，同样依赖于h的大小。



（a）



（b）

图26 （a）在原子的传统行星模型中，电子被认为绕着质子以一定的轨道运行，轨道半径即玻尔半径。但是量子力学用电子的波函数取代了沿轨道运行的电子这种想法。（b）现在，电子可以在波函数范围内的任意位置被“发现”，但它最有可能出现在传统行星模型预测的轨道位置

阿什特卡写道：

圈量子宇宙学表明，一种来自几何空间的量子本质的新的排斥力会发生作用，它强到足以与经典的引力相抗衡，不管质量有多大。正是这种力量阻止了奇点生成。[注]

这类量子斥力在时空弯曲较为轻微（如只有与普朗克尺度相关的曲率的1%）时完全可以忽略。实际上，在质能密度ρ远小于ρ_C时，$-\rho/\rho_C$极小，此时半经典圈量子宇宙学解与广义相对论得出的解完全相同。但当质能密度与空间曲率增加到接近ρ_C时，空间的量子本质产生的效应会开始累积，并开始对抗引力。

当然，在接近临界密度的时候，构建这种半经典圈量子宇宙学理论所需要的近似也会失效。但在2007年，阿什特卡、帕夫洛夫斯基和辛格证明，简化版的圈量子宇宙学理论也能得出同样的结论。

因此，圈量子宇宙学告诉我们，我们的宇宙并不是来自一场爆炸，而是来自一场发生在138亿年前的反弹。虽然有些无神论者更喜欢“从无到有”的宇宙观，[注]但我们今天所知的宇宙可能是从反弹之前已经存在的宇宙中产生的。

那在大爆炸之前，宇宙又是什么呢？根据圈量子宇宙学的结论，答案是很明显的：我们的宇宙在诞生之前是另外一个宇宙，那个宇宙在一场大挤压中收缩，然后反弹到如今这个不断膨胀的阶段。而这又会不可避免地产生另外一个问题：我们怎么才能知道此前的宇宙都发生过什么呢（真的发生过什么的话）？

2007年的时候，博约瓦尔德的回答是“不会太多”。他的结论是，此前的宇宙在压缩和反弹的过程中，所包含的信息绝大部分都已经丢失，甚至全部丢失了。他把这一现象称为“宇宙的健忘”（cosmic forgetfulness）。[注]反弹前后的宇宙不可能相同，不仅结构和外观不同，而且物理定律和粒子种类可能不同。我们可以尽我们所能地观察，但永远都不可能了解任何反弹之前的情况。

不过，其他圈量子宇宙学理论学家并不赞同他的观点。2008年，科里基和辛格提出，反弹之后产生的宇宙中的量子涨落跟之前的宇宙间有很强的联系，就好像“宇宙（几乎）完全记得之前的样子”[注]一样。自2008年以来，进一步的研究支持了这一结论。从实际的角度看，反弹之前存在的宇宙跟今天我们见到的宇宙在各个方面都是相似的。在宇宙收缩到由普朗克密度定义的“瓶颈”时，宇宙中的一切物体都被加热到难以置信的高温，不过现在已经有一定的根据认为之前的宇宙中的定律和粒子仍然是我们所熟悉的。虽然它们可能会随着每一次反弹而稍微扭曲一点点，但谁知道呢？

博约瓦尔德仍然坚持他的原始观点，认为物质（而非时空）分布过程中的量子涨落会让宇宙“忘记”之前的经历。[注]如今这一问题尚未解决，但据我所知，圈量子宇宙学界更倾向于认为宇宙会回忆起之前的情况，而非忘记。

阿什特卡和他的同事通过这种方式确定了一致的圈量子宇宙学理论的细节，从而为关于早期宇宙的物理学打开了一扇窗，展现出无数激动人心的新的可能性。2007年8月，宾夕法尼亚州立大学引力物理学与几何学中心改组为引力与宇宙交叉学科研究所，由阿什特卡出任主任。如今，该研究所拥有三个研究中心，一个研究基本理论，一个研究理论与观测宇宙学，还有一个研究粒子与引力天体物理学。

有一段时间，理论物理学家认为反弹的物理过程完全可以为宇宙的

快速暴胀提供基础（暴胀对于解释宇宙的平直性和视界问题是必需的）。这看起来是个完美的结论，但鉴于∧-CDM模型必须以暴胀为前提假设——该模型需要手动把暴胀子场加进来，却没有一个明显而自然的原因，这一过程看起来可能很人为、很随意。然而，我们要记住，粒子物理标准模型中的希格斯场也是这么产生的。（看看希格斯场多成功！）

在圈量子宇宙学中，从反弹过程中产生的宇宙经历了一个迅速的膨胀过程，理论物理学家称之为超暴胀（superinflation）。阿什特卡指出："超暴胀在广义相对论中不可能发生，但在圈量子宇宙学中是必经过程。"[注]2002年，博约瓦尔德提出，超暴胀就是我们宇宙所需要的暴胀，它还能解释残留膨胀的过程，以及为什么我们今天观察到的宇宙学常数这么小。[注]在近期的圈量子宇宙学模型中，超暴胀发生在反弹后的宇宙开始膨胀之时，当时的质能密度从ρ_c降到了$\rho_c/2$。

但后来，理论物理学家意识到，超暴胀并不能替代标准∧-CDM模型中的慢滚暴胀过程。它的持续时间不够长，不能产生所有需要的效应。单靠圈量子宇宙学无法解释我们宇宙的大尺度结构。这一事实令人很失望，物理学家别无选择，只能随大流地给圈量子宇宙学加上一个暴胀子场，其性质与如今标准的暴胀大爆炸模型中的暴胀子场相似。

不过，这个做法也带来了一点儿额外的好处。将暴胀与圈量子宇宙学结合起来，可能可以解决与平直性问题和视界问题相关的精细调节问题。不过，我在前文也提过，要想与暴胀结合起来，也要求圈量子宇宙学本身进行进一步的调节。暴胀后的宇宙结构极其依赖它在进入暴胀时的初始条件。就暴胀子场中量子涨落的本质而言，要想经历程度刚刚好的暴胀，最终得到我们宇宙中所观测到的恒星、星系、星系团和巨洞，其概率是极低的。科学家对得到这样一个宇宙的概率有不同的估算值，但大多数结果都是10的很多次方分之一。[注]暴胀后的宇宙要刚好变成现在的这个样子，其概率之低让我们要解释它的存在，就不得不承认其参

数一定经过了精细的调节。

当然，我们可以耸耸肩，说道：“既然我们只有一个宇宙，我们便无须讨论这个问题了。”[注]但无法解释的巧合会让物理学家很恼火，尤其是在这些巧合看起来像是某种宇宙的阴谋的时候。

引入暴胀的好处这时就显现出来了。将圈量子宇宙学与标准∧–CDM模型中使用的暴胀子场结合起来，把我们如今的宇宙从一个原本看起来极其不可能的结果变成了一个近乎必然的结果。[注]

差异的起源是很细微的。在常规的广义相对论基础上加上暴胀，大爆炸奇点的存在意味着我们不可能设置暴胀之前的初始条件，任何事情都可能发生。这才导致我们需要诉诸精细调节，从而让暴胀进行得恰到好处，刚好能形成我们如今观察到的宇宙。但在圈量子宇宙学大反弹模型中，宇宙的起源点和初始条件的定义清晰得多，而反弹和超暴胀的物理学过程表明宇宙可以“像被漏斗导入一般进入一系列特定的初始条件，能保证它发生慢滚暴胀（并持续足够的时长）”。[注]

换句话说，宇宙被推入了“正确”的方向，沿着一条通往动态吸引子的轨迹，经历了足够长时间的慢滚暴胀，使其密度下降到比反弹瞬间的临界密度低11个数量级。不管我们在反弹的一瞬间具有的条件如何，吸引子的存在保证了宇宙最终多多少少变成了我们如今观察到的样子。阿什特卡和戴维·斯隆（David Sloan）发现，即使调整暴胀子场的质能——∧-CDM模型中的另一个精细调节的参数，对暴胀阶段的引发与持续时间也不会有太大影响。

是的，我们仍然需要假设暴胀的存在，但反弹与超膨胀的物理学过程让暴胀的初始条件看起来不那么任意了。

还有最后一点。尽管圈量子宇宙学不能帮助我们解释目前这个小的、正的宇宙学常数的起源，但它仍然能以跟标准大爆炸模型中同样的

方式，用弗里德曼-勒梅特-罗伯逊-沃克（FLRW）度规来构造。引入宇宙学常数Λ并不会影响与奇点、超暴胀和慢滚暴胀动力学相关的任何结论。

我觉得在三个方面里有两个方面是优点，目前来看至少不算坏。

一切看起来都很好，但这个时候你可能就要问出一直在脑海里盘旋的那个问题了：我们一直在讨论的反弹宇宙、超暴胀和慢滚暴胀，都是在一个背景时间中发生的，但我们难道不是要在一个让时间消失或者让时间演生出来的量子引力理论中理解这些现象吗？

“时间冻结”难题当然没有消失。在原始的惠勒-德威特方程中，标度因子本身的大小被用来标记时间，但在圈量子宇宙学中，标度因子的表现是非线性的，意味着用它来标记时间不可行（我们的经验认为时间以均匀、线性的方式嘀嗒流逝，但圈量子宇宙学中的标度因子并不是这样的）。阿什特卡、帕夫洛夫斯基和辛格发现，他们需要引入一种新的无质量的场来演生出时间，以标记宇宙演化中的事件。阿什特卡和辛格后来解释道：“这样一种内部的亦即演生的时间并非形成一个完整、自足的理论所必需的，但它让宇宙动力学过程的物理意义更为清晰可见，我们可以更容易地从中提取出对现象的预测。”[注]

不过，让我们先暂停一下。在第10章中我讲到，圈量子引力理论中的时间可以通过自旋泡沫方法产生，时空作为动态自旋网络中不同的节点与连接之间一系列跃迁的历史路径的叠加演生而来。为什么不用这种方法来构造自旋泡沫宇宙学呢？这样就不需要额外引入一个人为的、无质量的场来记录时间了。

这个问题的存在看起来是很明显的，但直到2007年，研究领域与自旋泡沫数学形式较为接近的理论物理学家中，都没有一个人想起来研究这个问题。罗韦利解释道：“当时，在马赛的我们这些人中没有一个人在做宇宙学相关的工作。”然后，一位名叫弗兰切斯卡·维多托

（Francesca Vidotto）的年轻的意大利本科生在为期一年的伊拉斯谟奖学金的支持下，来到理论物理学中心学习。[注]她看到这里没有一个人在研究自旋泡沫宇宙学，深表震惊。“两三年以后，马赛这边所有人都开始研究量子宇宙学了。”[注]

罗韦利和维多托开始合作，在2008年和2009年各发表了一篇关于自旋泡沫的宇宙学意义的论文，并在2010年与欧金尼奥·比安基合作，迈出了建立正式的自旋泡沫宇宙学的第一步。2009年，阿什特卡与米格尔·坎皮利亚（Miguel Campiglia）和亚当·亨德森（Adam Henderson）合作，独立发表了一篇论文，也加入了这个行列。

这些论文中的大多数都在解决与自旋泡沫方法的应用相关的技术问题，不过它们也标志着很大的进展。理论还没有成熟到足以为接近大爆炸时期的宇宙提供详细的描述，但它确实又一次强烈地暗示，经典的大爆炸奇点在这个过程中可以消除。面积量子的存在限制了宇宙收缩的加速度，因此，宇宙不再会收缩至奇点（这意味着收缩的加速度无穷大），收缩速度在质能密度接近普朗克尺度时会慢下来。[注]

这方面的问题还有待研究，我们可以对这片空间保持密切观察。

在很大程度上，圈量子宇宙学为我们提供了一个比标准大爆炸模型（即弦论宇宙学）更为优雅的宇宙，至少提供了一套更为优雅的描述和解释。它消灭了大爆炸奇点，而且尽管我们仍需引入暴胀模型，但大反弹和之后的超暴胀能以一种完全自然的方式将宇宙推往我们想要的方向，无须对初始条件进行精细调节。不过，还有这么一个问题：这个理论描述的我们今天的宇宙（或者不久后的将来的宇宙），会产生什么我们可以观测到的特殊效应呢？如果不能回答这个问题，哪怕它再优美，我们也就仅仅是在审美的角度讨论问题。

还是有希望的。很多人认为，普朗克尺度附近的物理学现象完全超

出了我们在地球实验室中可能设置的任何仪器所能产生的条件。[注]但如今的宇宙，已经不再只是神学家、哲学家和理论物理学家的专属领地了。我们已经看到，它很快就要成为实验科学的终极游乐场。

将大爆炸换成大反弹，可能会改变宇宙诞生初期的普朗克尺度物理学现象。这些物理学现象会留下标记，改变慢滚暴胀在宇宙中印刻下的涨落本质，即改变宇宙背景辐射。我们可以通过比较实际背景辐射与标准大爆炸模型预言的背景辐射来寻找这一改变。

不过，这样的改变是极为细微的。研究人员在全天背景辐射的温度差异的平方的变化与天空中的角度变化之间建立起了联系，数据来自普朗克卫星。[注]他们得到的结果绘制而成的曲线图包含一个最高峰，还有两个高度相等的次高峰，在角度减小时还出现了一系列幅度逐渐减小的振荡。这些振荡即为复合时期横跨宇宙来回传播并反弹的声波所留下的印记。[注]

对比圈量子宇宙学结合慢滚暴胀的预测结果与标准暴胀大爆炸模型的预测结果，研究人员发现，两者之间的差异在大角度区域较为明显，此处的误差棒也最大。不过，仍然可以看出圈量子宇宙学/暴胀模型对现有数据的拟合更好。

圈量子宇宙学的大反弹与标准模型中的大爆炸产生的曲线略有差别，在角度最大的区域差别最明显。圈量子宇宙学与慢滚暴胀结合的理论预言的温度变化比标准暴胀大爆炸模型更小。这种差异在大角度的计算结果中更明显。对于小角度而言，圈量子宇宙学和标准大爆炸模型预测的结果相同。

不幸的是，两个模型的预言差异最大的地方，也是普朗克卫星最新数据的标准差最大的地方。不过，最近阿什特卡与布拉杰什·古普特（Brajesh Gupt）在早先阿什特卡与伊万·阿古略（Ivan Agullo）和威廉·尼尔森（William Nelson）的工作的基础上发表了最新的计算结果，表

明圈量子宇宙学结合慢滚暴胀的模型预言的功率谱能比标准大爆炸模型更好地拟合现有的普朗克数据。[注]，[注]

显然，要得到确定的结论，我们不能只依赖宇宙的指纹，还需要更成熟的测量——宇宙学里的DNA分析。

不过还有一项特征可以测量。暴胀以原初引力波的形式留下了独特的“签名”，它们是时空中的涟漪，直接起源于暴胀。这种引力波不同于LIGO在2015年首次探测到的引力波，后者是由黑洞或中子星并合产生的，产生的时间要比原初引力波晚得多。

原初引力波极难探测，它们可能会以宇宙背景辐射的B模偏振的形式被探测到。2014年3月，BICEP2实验[注]宣布探测到了这类偏振效应，引起了一阵轰动。然而，同年9月，科学家根据普朗克卫星的数据分析发现，BICEP2观测到的效应完全来自宇宙中尘埃粒子的干扰。

我们别无他法，只好直接寻找原初引力波，而非借助宇宙背景辐射中的细微效应。要想做到这一点，就需要一个建立在太空中的观测设备，而好消息是，2017年6月，在成功完成了一项探路任务之后，欧洲空间局通过了发射太空激光干涉仪（Laser Interferometer Space Antenna，LISA）的决议。这项任务要把三台干涉仪发射到围绕太阳的轨道上，形成一个三角形的阵列，两两之间相距250万千米，尾随地球运动。在不同的干涉仪之间反射的光线产生的小的干涉效应，会透露关于经过的引力波的信息。LISA计划于2034年发射。

当然，能发出引力波的来源很多，因此如果原初引力波真的存在，就会形成某种背景噪声。如果要逐一检验所有关于原初宇宙的不同理论，我们必须能够非常详细地分析这种噪声。圈量子宇宙学的一个好处在于，受反弹和超暴胀影响，它预言的低能原初引力波与标准大爆炸模型差异很大。[注]

尽管如今的宇宙背景辐射观察不能给我们确定的答案，但这些观测的精确度一直在改善。再过大约20年，我们也许就能仔细观察原初引力波的波谱了（如果它们存在）。“局势尚未稳定，”罗韦利说，“但像我一样将一生奉献给寻找量子空间的奥秘的人一定会密切关注最新的情况，焦急而充满希望地等待观察、测量与计算手段的进步，并期待着大自然告诉我们到底是对了还是错了的那一刻。”(注)

---

1. 有必要指出，如今组成粒子物理标准模型的量子场论足以描述大爆炸之后10–12秒时的状态，根据物理学家的说法，这个时候时间与希格斯场的作用已经引发了对称性破缺，将弱力与电磁力分开。我一直认为，能将宇宙的历史追根溯源至大爆炸后10–12 秒时的状态已经很了不起了，但我知道有些人永远不会满足于此……

2. See,for example,Anna Ijjas,Paul J.Steinhardt,and Abraham Loeb,‘Pop Goes the Universe’,Scientific America,January 2017,32–9.This was a rather provocative article,attracting a response from no less than 33 theorists,including Alan Guth,Andrei Linde,Sean Carroll,Stephen Hawking,Lawrence Krauss,Juan Maldacena,Lisa Randall,Martin Rees,Leonard Susskind,Alexander Vilenkin,Steven Weinberg,Frank Wilczek,and Ed Witten.For a more detailed overview of the controversy,see http://www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/?p=9289.

3. Abhay Ashtekar,‘Loop Quantum Cosmology: An Overview’,General Relativity and Gravitation,41 (2009),707–41; arXiv:gr-qc/0812.0177v1,30 November 2008,p.1.Italics in the original.

4. Stephen W.Hawking,A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes,Bantam Press,London,1988,p.51.

5. 摘自《时间简史》，霍金著，许明贤、吴忠超译，湖南科学技术出版社，2003 。——译者注

6. Martin Bojowald,‘Absence of a Singularity in Loop Quantum Cosmology’,Physical Review Letters,86 (2001),5227–30; arXiv:gr-qc/0102069v1,14 February 2001,p.1.Italics in the original.

7. Ibid.,p.4.The italics are mine.

8. Carlo Rovelli,quoted in Anil Ananthaswamy,‘From Big Bang to Big Bounce’,New Scientist,13 December 2008,p.32.

9. Suppose the distance between two galaxies is measured to be D at time t.If we further suppose that the distance was D_0 at some earlier reference time t_0 then the scale factor a is given by the ratio D/D_0.An expanding universe implies that D is greater than D_0 (the galaxies get

further apart as time progresses) and so a is greater than 1.A contracting universe implies that D is less than D_0 (the galaxies get closer together as time progresses) and a is less than 1.Writing $D=aD_0$,and differentiating with respect to time gives: $\frac{dD}{dt}=D_0\frac{da}{dt}$,because D_0 is a reference distance at a fixed timet t_0 and so is constant with respect to time.If we now denote time derivatives using a dot notation we have $\dot{D}=\dot{a}D_0$.But we also know that $D_0=D/a$,so we can substitute for D_0 to give: $\dot{D}=\frac{\dot{a}}{a}D$.Now,$\dot{D}$is the rate of change of distance between galaxies with time,which in an expanding universe is also the recession velocity,v,the speed with which galaxies are receding from each other.If we set the Hubble parameter$H=\frac{\dot{a}}{a}$,then we recover Hubble's law: v=HD—the speed of a distant galaxay is linearly related to its distance.

10. 感谢亚历杭德罗·科里基帮我解决了关于这一部分的一些困惑。

11. Abhay Ashtekar,personal communication,11 December 2017.

12. Alejandro Corichi,personal communication,23 November 2017.

13. 有趣的是，这一可以得出精确解的圈量子宇宙学的版本在大体积条件下可以近似得到惠勒–德威特方程，但后者不能由前者以面积量子和体积量子接近于零（等价于普朗克常数h 为零）的方式外推得到。这个半经典的圈量子宇宙学理论在本质上仍然是一个离散的理论。

14. The Planck density is given by the Planck mass m_p divided by the cube of the Planck length,l_p: $\rho_p=m_p/l_p^3$,or $2\pi c^5/hG^2$.In fact,the critical density ρ_c in LQC is about 40 per cent of ρ_p,or about 2×10^{96} kilograms per cubic metre (see Ashtekar,'Loop Quantum Cosmology',p.16).

15. Ibid.,p.19.

16. See,for example,Lawrence M.Krauss,A Universe from Nothing: Why There is Something Rather than Nothing,Simon & Schuster,London,2012.

17. Martin Bojowald,quoted in 'What Happened Before the Big Bang?',1 July 2007,available at https://phys.org/news/2007-07-big.html.See also Martin Bojowald,'Harmonic Cosmology: How Much Can We Know about a Universe before the Big Bang?',Proceedings of the Royal Society A,464 (2008),2135–50; arXiv:gr-qc/0710.4919v1,25 October 2007,p.14.

18. Alejandro Corichi and Parampreet Singh,'Quantum Bounce and Cosmic Recall',Physical Review Letters,100 (2008),161302; arXiv:gr-qc/0710.4543v2,27 March 2008,p.1.

19. Martin Bojowald,personal communication,10 November 2017.See also Martin Bojowald and Artur Tsobanjan,'Effective Casimir Conditions and Group Coherent States',arXiv:math-ph/1401.5352v1,21 January 2014.

20. Abhay Ashtekar,quoted in Anil Ananthaswamy,'Big Bounce Cosmos Makes Inflation a Sure Thing',New Scientist,13 October 2010.The italics are mine.

21. Martin Bojowald,‘Inflation from Quantum Geometry’,Physical Review Letters,89 (2002),261301; arXiv:gr-qc/0206054v1,18 June 2002.

22. See,for example,Roger Penrose,The Emperor’s New Mind: Concerning Computers,Minds and the Laws of Physics,Vintage,London,1990,pp.440–7,and G.W.Gibbons and Neil Turok,‘The Measure Problem in Cosmology’,Physical Review D,77 (2008),063516; arXiv:hepth/0609095v2,2 January 2007.

23. Abhay Ashtekar and Parampreet Singh,‘Loop Quantum Cosmology:A Status Update’,Classical and Quantum Gravity,28 (2011),213001;arXiv:gr-qc/1108.0893v2,22 August 2011,p.77.

24. 概率大于99.999%，详见尾注20 。

25. Abhay Ashtekar and David Sloan,‘Loop Quantum Cosmology and Slow Roll Inflation’,Physics Letters B,694 (2010),108–12; arXiv:gr-qc/0912.4093v2,2 October 2010,p.1.

26. Ashtekar and Singh,‘Loop Quantum Cosmology’,p.8.The italics are mine.

27. 伊拉斯谟项目（The Erasmus Programme）是欧盟主持的一项交换生项目，从20世纪80 年代末开始。它为欧盟学生在欧盟内部其他国家的学习提供资助。

28. Carlo Rovelli,personal communication,21 June 2017.

29. See Carlo Rovelli and Francesca Vidotto,Covariant Loop Quantum Gravity: An Elementary Introduction to Quantum Gravity and Spinfoam Theory,Cambridge University Press,Cambridge,UK,2014,pp.236–7.

30. I’ve said ‘judged by many’ because there are proposals for laboratoryscale experiments to probe the Planck scale,such as those described in Igor Pikovski,Michael R.Vanner,Markus Aspelmeyer,M.S.Kim,and Caslav Bruckner,‘Probing Planck-scale Physics with Quantum Optics’,Nature Physics,8 (2012),393–7.

31. The term ‘angular scale’ refers to the spherical functions defined on the surface of a sphere,known as spherical harmonics,first introduced by French physicist Pierre Simon de Laplace in 1782.Such functions are characterized by polar angles θ (a co-latitude) and Φ (essentially a longitude) and integer numbers l and m,in which l determines the number of nodes in the spherical ‘standing waves’ and m takes integer values from–l to+l (in Schrödinger’s wave mechanics of the hydrogen atom,these numbers became the quantum numbers associated with the electron’s orbital motion).The relation between‘angular scale’—essentially the value of θ—and l is complicated,but as a very rough guide we can assume θ=180°/l,i.e.angular scale decreases as l increases.

32. 我愿意把它比喻成宇宙的歌声，但把它看作在糟糕的一天中发出的叫喊或许更为恰当。

33. Ivan Agullo,Abhay Ashtekar,and William Nelson,‘The Preinflationary Dynamics of Loop

Quantum Cosmology: Confronting Quantum Gravity with Observations’,Classical and Quantum Gravity,30 (2013),085014.See also arXiv:gr-qc/1302.0254v2,8 April 2013.

34. Abhay Ashtekar and Brajesh Gupt,‘Quantum Gravity in the Sky:Interplay Between Fundamental Theory and Observations’,Classical and Quantum Gravity,34 (2016),014002.See also arXiv:gr-qc/1608.04228v2,12 November 2016.

35. BICEP代表宇宙泛星系偏振背景成像（望远镜），BICEP2则是在南极洲的阿蒙森–斯科特基地建立的第二代望远镜。

36. See,for example,Jakob Mielczarek,Thomas Cailleteau,Julien Grain,and Aurelien Barreau,‘Inflation in Loop Quantum Cosmology:Dynamics and Spectrum of Gravitational Waves’,Physical Review D,81 (2010),104049; arXiv:gr-qc/1003.4660v2,16 June 2010.

37. Carlo Rovelli,Reality is Not What it Seems: The Journey to Quantum Gravity,Allen Lane,London,2016,p.192.

第15章 黑洞熵、信息悖论与普朗克星

布赖恩·格林将一一细数超弦理论允许存在的卡拉比-丘流形比作细数“全球所有的沙滩上”共有多少粒沙子，[注]他真的不是在开玩笑。2003年，理论物理学家沙米特·卡赫鲁（Shamit Kachru）、雷娜塔·卡洛什（Renata Kallosh）、安德烈·林德（Andrei Linde）和桑迪普·特里维迪（Sandip Trivedi）发现了一种方法，可以让超弦理论的隐藏维度稳定下来——让线穿过卡拉比-丘空间的不同的洞。这一结构与类似本书中讨论的宇宙相一致，拥有一个小的正宇宙学常数。[注]

但结果表明，能做到这一点的方法数不胜数。这已经不仅仅是在讨论不同的卡拉比-丘空间的数目（沙粒的个数）了，而是在讨论让力线穿过各个洞有多少种不同的方式，继而能产生多少种不同的理论。这种穿针引线的方式决定了可能存在的超弦振动的本质，也决定了物理学常数、物理学定律，以及占多数的基本粒子种类。换句话说，每个可能存在的理论都对应着一种不同的宇宙。

那这样的理论共有多少种呢？对于有一个洞的卡拉比-丘空间来说，有10种穿针引线的方式，对于有两个洞的卡拉比-丘空间来说有10^2种，对于有三个洞的卡拉比-丘空间来说有10^3种，以此类推。好吧，那又有多少个洞呢？美国弦论学家乔·波尔钦斯基（Joe Polchinski）问了几位数学家，他们的答复是，洞的数目最多可能“在500个左右”[注]。

根据粗略估计，每片沙滩上的沙粒数目大概在7.5×10^{18}个左右，这个数字已经很大了。不过，能产生宇宙学常数为正的宇宙的不同理论种类数最高可达10^{500}种。几年后，理论物理学家发现，可能有无数种理论都可以产生宇宙学常数为一个小的负值的宇宙。[注]在这么多种候选理

论中，我们该选哪种呢？物理学家完全没有答案。

施特罗明格早在1986年就证明，存在海量一致可行的超弦理论，只考虑卡拉比-丘空间的话还可能有更多，因此这一理论的预测能力就大大减弱了。可见，弦论存在众多可能的版本，这一结论并不是新发现，只是直到2003年才成为弦论圈中公认的事实。

我确实相信，在理论物理学史上存在这么一段时间，当时物理学家认为这类结果代表着一个学科的失败。而我不是唯一这么想的人。2006年，斯莫林写道：

对于花了好几年甚至几十年研究弦论的人，这无疑是极为痛苦的。我也很痛苦，我之前也在弦论上投入了相当多的时间。我只能想象我那些把整个职业生涯都押在弦论上的朋友们此时此刻都有何感觉。然而，尽管被伤透了心，我们还是不得不承认，在这样的情况下，承认弦论被证伪了是理性而诚实的反应。[注]

没有哪种可信的物理学描述能指向独一无二地只描述我们的宇宙、我们观测到的物理学定律和粒子的结构，在这样的情况下，你可能会倾向于认为我们无路可走了，只能回头重新绘制整个图景。

但事实并非如此。科学家有时候固执得令人吃惊，不愿意舍弃自己珍视的概念，哪怕所有的证据看起来都不支持他们。在发现自己掉进一个很深的坑里的时候，他们会乐观地找来一把更大的铁锹，继续挖它。

1983年，出生于苏联的理论物理学家亚历山大·维连金（Alexander Vilenkin）提出了大爆炸宇宙学标准模型的慢滚暴胀之外的另一种模型。1986年，另一位生于苏联的理论物理学家安德烈·林德进一步阐述了它，该模型如今被通称为永恒暴胀（eternal inflation）。在永恒暴胀模型中，我们的宇宙只是无数个暴胀时空的“泡泡”中的一个，由一片广袤的暴胀子场（或多个这样的场）中的量子涨落所引发。在特定的条件

下，泡泡会像病毒或者一瓶刚开的香槟中的气泡一样增殖，这样的“暴胀多宇宙”在本质上就是永恒的，既没有开始也没有终结。在多宇宙中，任何事都可能发生。引发暴胀泡泡的量子涨落本质上是随机的，这就意味着多种多样的宇宙都可能产生，它们的初始条件可以形成连续谱，给每个宇宙带来不同的物理学定律（如不同的宇宙学常数）。

很多弦论研究者并不认为存在10^{500}甚至无穷多个理论版本就标志着超弦理论的失败，有些（当然不是全部）理论物理学家甚至用它来证明，弦论包含的所有这些不同情况，实际上描述了多重宇宙的情景。在此基础上，他们加入了一些美妙的循环论证，称为宇宙学人择原理。确实存在难以计数的不同的宇宙，但我们恰好处在一个物理学定律和基本粒子类型刚好能支持生命存在的宇宙也并不那么令人吃惊——毕竟，如果宇宙并非如此，我们就不可能存在了。看吧，我们并没有理由抛弃超弦理论，至少现在没有。

斯坦福大学理论物理学家伦纳德·萨斯坎德于2003年发表了题为“弦论的人择景观”的论文，[注]让宇宙学人择原理蔚然成风。这种数不胜数的多个宇宙的景象，如今通常被称为“宇宙景观”（cosmic landscape）。[注]

瑞典裔美国宇宙学家马克斯·泰格马克（Max Tegmark）管这样的多重宇宙叫“II级多重宇宙”。在他的分级系统中，III级多重宇宙加入了量子力学的多世界诠释（格温妮丝·帕特洛的猫在一个宇宙中活着，在另一个宇宙中死了），而IV级多重宇宙则是所有可能的数学结构描述的多重宇宙。[注]

打个比方，这些弦论研究者像是先一意孤行地向着形而上学的卡律布狄斯旋涡驶去，然后弃船逃生了。最终得到的理论当然不可能是他们所希望得到的“万物理论”，而更像是个“任有理论”。

需要强调的是，我非常尊重弦论领域的理论物理学家。他们中的一

些人有着这一代人里最聪明的头脑。诺贝尔奖委员会一直严格遵守着这样的传统：他们只把诺贝尔奖颁给经过了实证检验的理论思想。英国理论物理学家彼得·希格斯，以及比利时理论物理学家弗朗索瓦·恩格勒特（François Englert）为此足足等待了49年（他们的论文首次发表于1964年）。直到CERN发现希格斯玻色子以后，他们才得到了诺奖委员会的承认。[注]因此，只要弦论无法做出不受实验或观测结果改变而动摇的预测，弦论研究者就永远不可能获得诺奖级别的荣誉。这个奖项不会颁给提出“有可能正确”的理论的物理学家。[注]

不过，2012年7月，俄罗斯企业家尤里·米尔纳（Yuri Milner）完全改变了这一切。米尔纳原本是一位粒子理论物理学家，在莫斯科国立大学与列别杰夫研究所学习过。他觉得自己在物理学上没什么天分，便转而用自己的财产建立了一份每年颁发的“突破奖”，奖金为300万美元，首批获奖者便是超弦理论的领军人物，包括威滕。林德也获得了一次突破奖的基础物理学奖，部分原因是他提出了暴胀多宇宙理论。

公平来讲，这一奖项也认可了实验在物理学研究中的重要作用。该奖项曾颁给发现希格斯玻色子的合作团队（2013年）、发现宇宙加速膨胀的超新星项目（2015年）、探测到中微子振荡的团队（2016年），以及探测到引力波的团队（2016年）。

当然，那是米尔纳自己的钱，他完全有理由随意处置。但在基础物理学奖方面，他的选择标准似乎一味偏向了抽象理论，只奖励智力上的成就，却不管这些理论有没有一丝能被实验证实或证伪的可能性。突破奖的颁奖仪式盛大奢华，又请来了全球范围内商界与娱乐界名人济济一堂，这一切都营造了“明星科学家”的效果。

我很尊敬米尔纳的慈善举动，但如果他是为了鼓励大众对理论物理学的关注，并支持理论物理学的进步，那么成立一个研究所、为博士后提供资助或者设立一些博士后岗位或许是更好的办法。

2014年，安德鲁·施特罗明格和伊朗裔美国物理学家库姆伦·瓦法（Cumrun Vafa）获得了物理学前沿奖，部分原因是他们1996年用超弦理论导出了一个著名的结果——黑洞熵的贝肯施泰因-霍金公式。注这一结果对于当代理论物理学以及寻找量子引力理论这一目标而言都极其重要，值得我们偏离一下主题，专门了解它是如何产生的，又意味着什么。

1970年11月的一天晚上，霍金突发灵感，意识到黑洞的视界永远都不可能收缩，这就意味着它的表面积永远不可能减小。如果一个黑洞吸收了太多掉进来的物质，它的表面积就必须相应地增加。而我们都知道，掉进黑洞的所有东西都不可能再出来。

还有另外一个为人熟知的物理学性质是在自发过程中永远都不可能减小的，它叫作熵。自发过程中熵不可能减少，这一行为是热力学第二定律的基础。那黑洞的表面积能否作为它的熵的一项衡量手段呢？1972年，以色列科学家雅各布·贝肯施泰因（Jacob Bekenstein）在他从普林斯顿毕业的博士学位论文里探讨了这个问题。不过，他的想法受到了众口一词的批判。一方面，在热力学中，一个物体的熵与其温度成负相关，只要拥有温度的物体都会发出辐射。注因此，讨论黑洞的熵毫无意义，一个黑洞怎么可能拥有温度，还会发出辐射呢？

几年以后，霍金尝试反驳贝肯施泰因的猜想。因为尚不存在成熟的量子引力理论，他尝试用广义相对论来描述黑洞本身，并且在视界周围的弯曲时空中使用量子场论。这样得到的结果让他完全震惊了：

然而，当我计算出结果之后，让我震惊乃至恼怒的是，哪怕是非旋转的黑洞都会很明显地以一个稳定的速率产生并发射粒子。我的第一想法是，这种辐射是我用的某种近似方式并不适用才产生的错误结果。我害怕贝肯施泰因会发现这一结果，并以此作为黑洞熵存在的进一步证据，而我还是很不喜欢他的这一想法。注

然而，贝肯施泰因一直都是对的。黑洞的熵（用S表示）正比于它的表面积（A），这一关系可以用一条简单到荒诞的公式来描述：S正比于$A/4$。[注]在理论上，黑洞确实有温度，也会发出辐射，[注]这种辐射后来被称为霍金辐射。

当物质掉入黑洞时，它的表面积会增加，因此我们会推断它的熵增加了。但它的温度其实降低了——这一结论看起来似乎荒诞不经，往黑洞里增加质量（能量）反倒让它温度更低了！这像是说，往火炉里添柴火，火炉反而变凉了。

不只如此，更糟糕的情况出现了。如果黑洞发射出霍金辐射，从定义上来说，它就必须失去能量（即质量），而这会令它的表面积减小，这就与霍金先前得到的结论相悖。从结果而言，黑洞的熵减小于发射出的辐射的熵，因此总的熵是增加的，这并没有违反热力学第二定律。然而，随着黑洞熵减小，黑洞的温度会上升，从而进一步提高霍金辐射的发射速率。这一过程会产生雪崩效应，让黑洞最终“蒸发”，以一场爆炸的形式完全消失。

这就带来了一个很大的问题。

大概来讲，熵是“无序度”的量度，与一个复杂系统的微观成分的组合及分布方式的数目有关。实际上，熵与一个复杂系统以一种特定方式分布的概率的对数有关。这一方程被刻在它的发现者、奥地利物理学家路德维希·玻尔兹曼（Ludwig Boltzmann）的墓碑上，玻尔兹曼在1906年因自杀离世。

热力学第二定律认为，在自发的变化过程中，一个系统的微观成分倾向于“扩张”，以占据更多可能的态。对写下这些文字的我来说，幸运的是房间里的空气分子向外扩张，占据了房间里的所有空间（这一状态出现的概率较高），而不是自发地同时聚集到某个角落，让我窒息而死（这一状态出现的概率极低）。

1948年，美国数学家和工程师克劳德·香农（Claude Shannon）发现，“信息”的概念也与概率的对数有关，因此他提出，信息与熵之间存在直接的关系。香农感兴趣的问题是电报交流的信息传输效率，但他得出的结论是通用的，适用于所有形式的信息，包括任何物质掉入黑洞后“编码”在波函数里的信息。

但黑洞蒸发时会发生什么呢？我们可能会认为黑洞里的信息就此从宇宙中消失，再也找不回来了。但这就带来了一个问题：量子力学要求在每一个量子过程中，波函数里初始编码的所有信息在结束时必须守恒。我们可以把这条规则看成某种概率的守恒。系统可能会改变，信息可能会以不同的形式呈现，但它本身必须一直存在。因此，黑洞蒸发带来的这种不可找回的信息丢失违背了量子理论的基础和结构。这一悖论被称为黑洞信息悖论。

当然，贝肯施泰因-霍金公式是用一种“半经典”的方式导出的：它先后独立使用了广义相对论和量子场论。我们知道，这种方法在黑洞的极端情况下就不能很好地起作用了。比方说，在一个黑洞蒸发的时候，它的表面积会减小，最终减小到我们需要考虑它的量子效应。而我们现在已经很清楚了，光凭广义相对论无法处理量子效应。

因此，我们可以期望一个成熟的量子引力理论重现这个公式，至少以第一近似的形式实现。如果我们运气好的话，它或许还能解决信息悖论难题。

虽然施特罗明格和瓦法的推导在数学上是可靠而强有力的，但它依赖于一类人为的所谓“极值”黑洞，其带的电荷产生的效应重要性不亚于质能产生的引力效应。然而，三维的极值黑洞的表面积原则上可以缩小到零，它所携带的熵（及其携带的一切含义）也会一同消失。在施特罗明格-瓦法推导中，唯一能阻止这一结果的方法是假设有一个额外维度（弦论要求隐藏6个额外维度，这里只隐藏5个），让这个多余的维度来保存熵。该推导还需要假设弦的作用强度精确为零，此外，所有弦论都

需要借助超对称的假设。康伦在《为什么是弦论？》中写道：“他们所做的这些计算能成立的世界，看起来一点儿都不像我们观察到的真实世界。”㊟

在施特罗明格和瓦法提出了原始推导之后，理论物理学家又做了很多工作，得出了一个更为复杂的熵表达式，让贝肯施泰因-霍金公式只作为其中的主导项。弦论成功预测了其他的项确实令人振奋，“哪怕它们只对数学宇宙中的黑洞成立”。㊟

那关于这一问题，圈量子引力理论的预测又是什么呢？

理论物理学家经常会收到各种各样的来路不明的邮件（有时候大众科学作家也会收到这类邮件），讲为什么量子力学完全错了、EPR佯谬可以如何解决、暗能量的本质，以及如何推导出一套全新的万物理论。有些人可能还会向你解释你最新发表的论文哪里错了。通常，收到这类邮件的物理学家只消看几行，就会直接移开眼神，动动手指点击删除键了。不过，1994年，罗韦利在回复了几封向他讨要论文的邮件以后，看到了一条令他意外的消息。这条消息来自基里尔·克拉斯诺夫，一名21岁的研究生，他在乌克兰基辅的博戈柳博夫理论物理研究所读书，发现了罗韦利论文中的一个小错误。

克拉斯诺夫已经自学了圈量子引力理论。由于他所在的研究所没人能指导他，他只能完全靠自己，根据已经发表的论文来研究如何应用这一理论。这些论文引领了他，让他“无须重新发明轮子”，得以用自创的技巧将费米子耦合到引力场中。㊟他对这一课题的掌握程度以及创造性让罗韦利大为惊讶。

他们开始了活跃的通信。在1995年5月于华沙举行的一场会议上，克拉斯诺夫与罗韦利、斯莫林和圈量子引力理论圈的其他人见了面，这次会面给他留下了很深的印象。

受到斯莫林论文的启发，克拉斯诺夫一回到基辅就开始继续和罗韦利通信，两人迅速开始尝试用圈量子引力理论来计算黑洞熵。他们都意识到，圈量子引力理论为熵与面积提供了一种非常直接的联系：熵由系统可能拥有的不同量子态的总数的对数决定，而在圈量子引力理论中，自旋网络里的连接正与量子空间态有关，由面积量子决定，面积量子又反过来与普朗克长度的平方相关。

在这一问题中，自旋网络的连接（面积）比节点（体积）更重要，因为连接能够“刺穿”黑洞的事件视界（即连接的一头会消失在视界的背后），每刺穿一次，就赋予视界一块由连接所带有的量子数决定的面积（见图27）。这样一来，只要计算给视界表面赋予一个给定面积的所有不同方式数目之和的对数，就能得到黑洞熵了，克拉斯诺夫称之为“几何熵”。

不过，在这样计算以后，他们没能直接得到结果。贝肯施泰因-霍金公式称熵正比于面积，但克拉斯诺夫和罗韦利在第一次尝试中得到的结果是熵正比于面积的平方根。肯定有哪个地方出错了。

1996年3月，在华沙参加另一场会议时，克拉斯诺夫想到了一个更进一步的思路，可以让他得到正确的黑洞熵的表达式，他迅速在预印本网站上发布了一篇论文。㊟罗韦利激动万分，他立即想到了改善克拉斯诺夫的计算方法的办法，提议一同撰写论文，但克拉斯诺夫觉得自己对这个问题的理解还不成熟，因此拒绝了。罗韦利很惊讶，以为克拉斯诺夫觉得他自己的灵感应该由自己独自撰写成文。因而，克拉斯诺夫和罗韦利两人在差不多同一时候分别独立发表了对贝肯施泰因–霍金公式的推导。㊟然而，虽然两个人的推导都得出了熵与面积关系的正确形式，但两人都觉得理论仍然有些问题，并不满意。

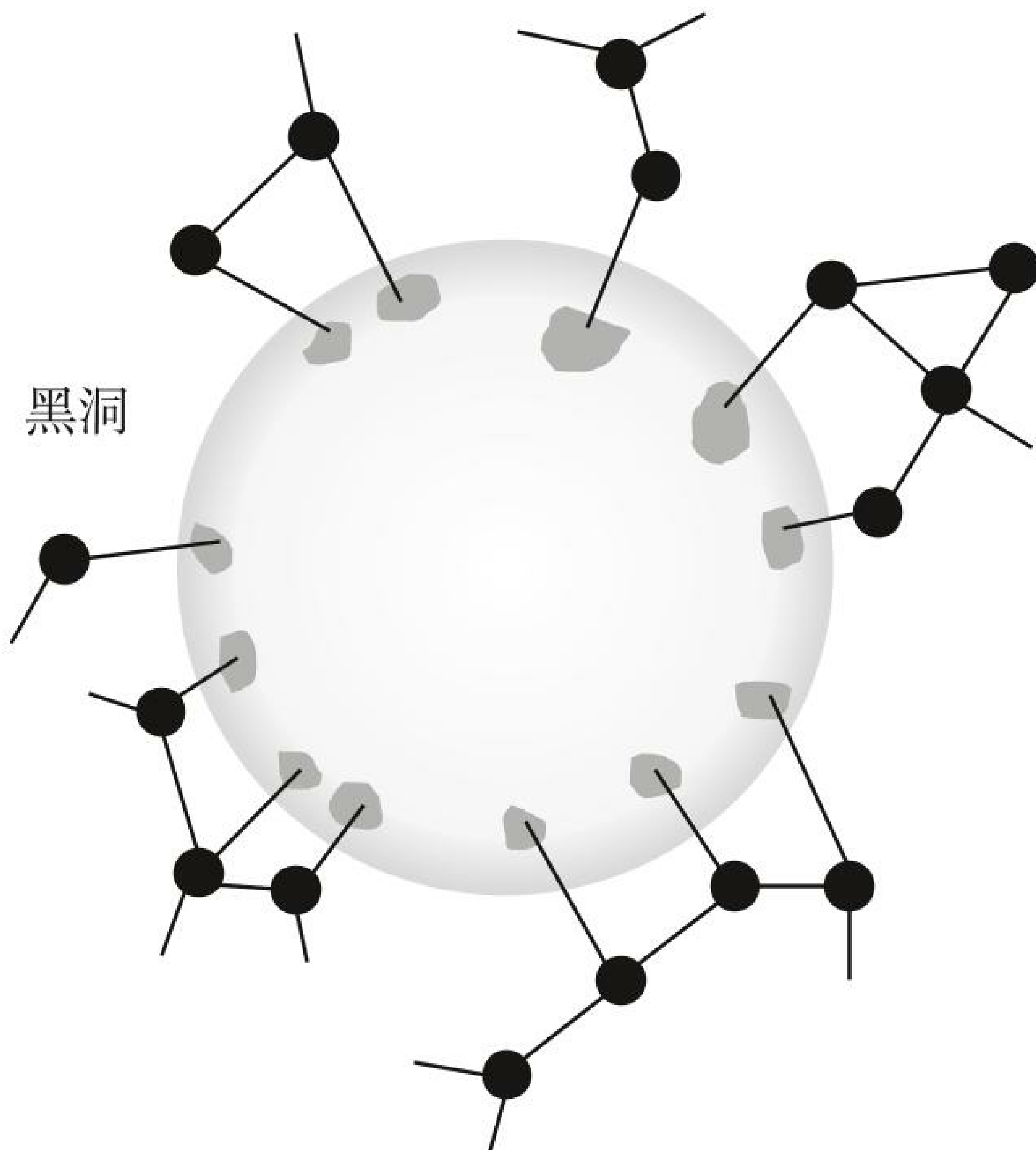


图27 克拉斯诺夫发明了一种方法，通过计量自旋网络中的连接刺穿黑洞表面的次数来计算黑洞熵。每次刺穿都赋予表面一个特定的面积量子数，而黑洞熵就是赋予表面一个给定面积的不同方法总数的对数

克拉斯诺夫继续思考这一问题，从斯莫林的论文，以及与罗韦利和在基辅的一位年长的同事尤里·什塔诺夫（Yuri Shtanov）的通信中寻找灵感。1996年5月，他发布了关于黑洞熵的第二篇论文。这时，他越来越担心后苏联时期乌克兰的科学研究会崩溃，在阿什特卡的支持下，当

年夏天他来到美国宾夕法尼亚州立大学的引力物理学与几何学中心读博。

在斯莫林的“连接性”论文中，他发展并应用了计算宇宙学视界处的熵的技巧，即把刺穿的情况通过边界项中的视界样例进行“编码”。但他没有意识到，可以将同样的技巧用在黑洞视界上。1997年1月，克拉斯诺夫意识到，斯莫林的方法可以用来解决他与罗韦利的推导遇到的难题。“我至今都记得，基里尔跟我解释他的想法时我有多激动。”斯莫林后来承认道，当然他也为自己之前的论文缺乏远见而后悔不已。[注]

克拉斯诺夫修订了他的第二篇论文。他的推导现在包含了巴韦罗–伊米尔齐参数γ，当时这个参数被引入了圈量子引力理论面积谱的表述中。克拉斯诺夫的结果与贝肯施泰因–霍金公式不同，在他的公式里，S正比于$A/4$，比例因子是$\ln 5/2\sqrt{2}\pi\gamma$。[注]显然，如果我们假设这个因子等于1，或者$\gamma=\ln 5/2\sqrt{2}\pi$（这个值约为0.1811），就能得到贝肯施泰因–霍金公式。

克拉斯诺夫与阿什特卡和宾夕法尼亚州立大学的同事讨论了自己的工作，还做了个报告，大家的想法在几年的时间里形成一锅“大乱炖”，很多观点日后被证明是错误的或者不相关的。1997年10月，阿什特卡、贝兹、科里基和克拉斯诺夫共同发布了一篇论文，用这些技巧表明非旋转黑洞的熵S正比于$A/4$，比例系数为γ_0/γ，γ_0是另外一个常数。[注]根据他们的推导，$\gamma_0=\ln 2/\sqrt{3}\pi$（约为0.127 4）。后来，克日什托夫·迈斯纳（Krzysztof Meissner）在2004年将这个值修正到0.237 53…。[注]

在这种情况下，只有假定$\gamma_0=\gamma$，才能得到贝肯施泰因–霍金公式，这可让人不太满意。理论物理学家希望尽量不要引入这样的假设。写这篇论文花了一些年头，但它奠定了一个一致的概念框架，也有详细的数学推导来支持。至少现在，理论物理学家有了清晰的目标，可以改善或者代替其中的某些方面。他们的工作也为确定巴韦罗–伊米尔齐参数的

大小提供了一条思路，只不过要通过另一个理论关系来实现。我们无法通过观测或实验来检验这个值，但阿什特卡与同事已经证明，对于所有种类的黑洞（非旋转的、旋转的、不带电的、带电的，等等）而言，这个值都是一样的。

这一结果强烈表明，贝肯施泰因–霍金公式应该是与参数选择无关的。几年之前，意大利理论物理学家欧金尼奥·比安基（他当时在圆周理论物理研究所工作）证明，确实如此。他用固定能量而非固定面积的方式来推导，得到的巴韦罗–伊米尔齐参数完美地互相抵消了，留下的结果正是*S*正比于*A*/4。注圈量子引力界也不是所有人都认同比安基的方法，罗韦利说："这篇论文其实惹恼了很多人。因为很多人对这一问题有自己的看法，欧金尼奥却抄近路回避了所有的方法，因此很多人都很抗拒他这篇论文的思路。但这篇论文仍然是一篇杰作。"注斯莫林同意他的话。

在我们转向下一话题之前，还有一件事要提。斯莫林在其"连接性"论文中注意到，阿什特卡及其同事提到，支配着他们计量自旋网络中刺穿事件视界的所有可能的过程的量子态对应着自旋量子数为1/2的自旋网络连接。我们知道任何一个自旋量子数为1/2的物体都有两个可能的取向，分别对应于+1/2和–1/2，例如"上/下""开/关""是/否"，这样两种可能性的状态可以与计算机的二进制（0与1）产生联系。

在这种联想的事情上，约翰·惠勒总是走在最前面：

在思考信息理论的基本存在时，我有了这样一个想法："物质来自比特。注宇宙及其所包含的所有东西，可能都来自无数次测量的"是/否"的选择结果……信息或许不仅仅是我们了解到的关于这个世界的知识，或许正是它们组成了世界。注

惠勒猜想，黑洞事件视界的面积是由普朗克长度平方量级的量子空

间像瓷砖一样铺起来的，每块“砖”都代表被视界“掩盖”的一个比特的信息（如图28所示）。阿什特卡及其同事总结道：“因此，在我们得到的详细结果和约翰·惠勒关于黑洞熵的‘物质来自比特’的猜想之间，存在一种奇特的相似性。”注

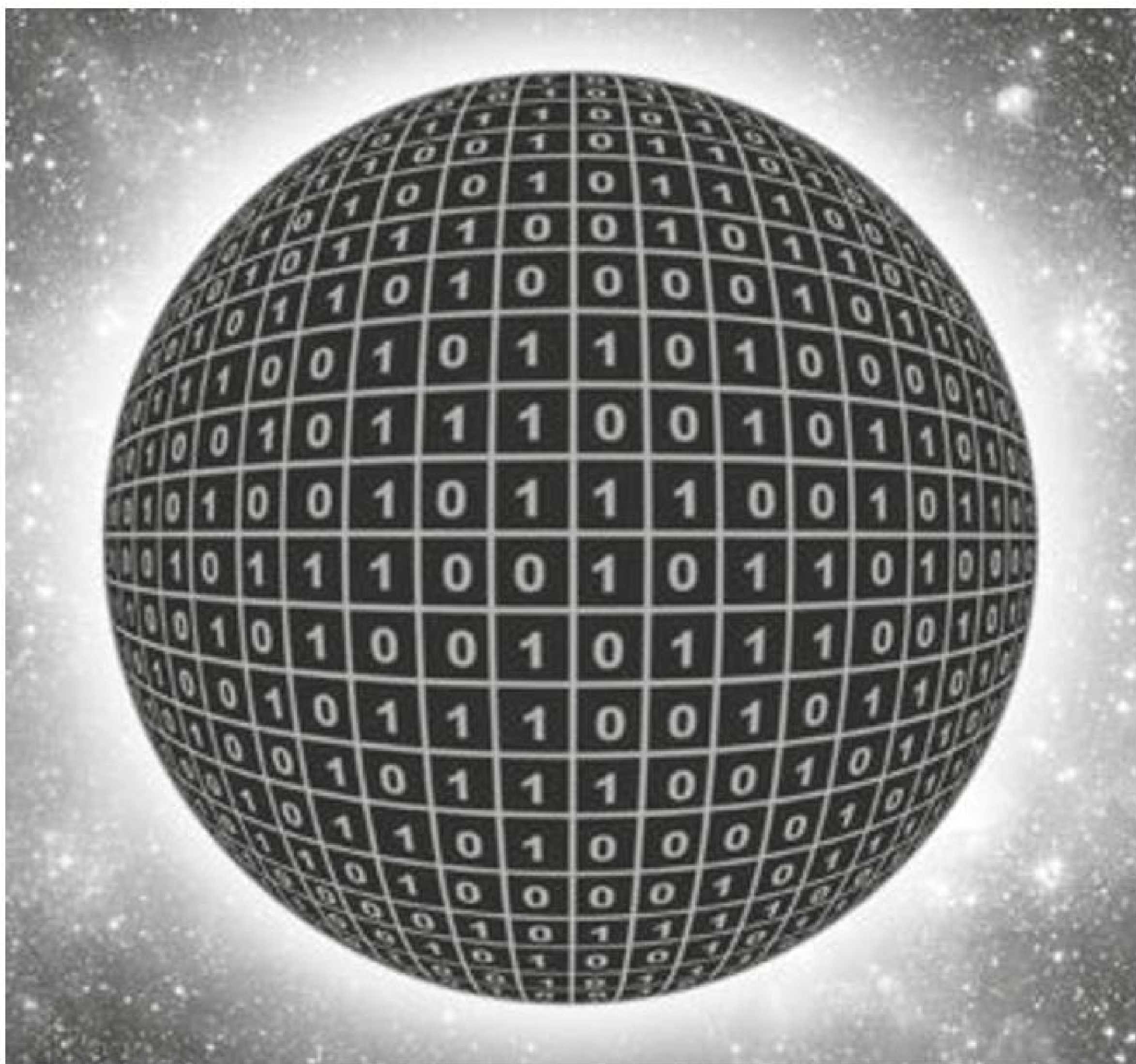


图28 惠勒之前设想，黑洞的表面由携带着信息比特（或量子比特）的量子空间镶嵌而成

当然，将信息提升到对物质现实的基本描述这样的地位，会带来一些影响。讲到这里，我想你至少明白了为什么理论物理学家如此乐于研究黑洞信息悖论。

在这一问题上，观点相对的理论物理学家之间的论战能写成生动的故事。霍金也乐于参与这样的争论，他坚持认为，黑洞中的量子信息会随着黑洞的蒸发而消失，再也找不回来。1997年，他与持相反观点的约翰·普雷斯基尔（John Preskill）和基普·索恩打了个赌。萨斯坎德和荷兰物理学家赫拉德·特霍夫特也相信信息会以某种形式保留下来。萨斯坎德在自己2008年出版的书《黑洞战争》（*The Black Hole War*）中讲述了这段物理学家之间的智力交锋。

如果黑洞带有的这些信息并没有就此完全消失，那它们要么以某种方式在表面被保存下来，最终以霍金辐射的形式发射出去，要么以某种遗迹的形式在黑洞完全蒸发之后残留下来。对萨斯坎德来说，后者看起来是不可能的，因此他以前者为目标开始研究。

1994年，听了特霍夫特来访问时随口发表的评论，萨斯坎德意识到“在任何一块空间区域中，能存储最多信息的莫过于它的边界”。[注]他将其称为全息原理。在第11章中，我们在量子场论的通用边界表述中遇到过类似的关系。

全息原理只是一个想法，并没有正式的理论基础。但在1998年，阿根廷理论物理学家胡安·马尔达塞纳（Juan Maldacena）提出了一个强有力的新猜想。他推导出，在某一种特定的超弦理论中，n维时空描述的物理学过程等价于对其（$n-1$）维边界应用超弦量子场论得出的结果。

这一结果令弦论圈里的很多人激动不已。它意味着，包含量子引力的超弦理论等价于一个不包含引力的固定背景时空中的超对称量子场论。威滕随后证明，超弦理论中总体时空里的一个黑洞，就等价于其边界表面上的一群由基本粒子（如胶子等）组成的热“汤”。

读罢威滕的论文，萨斯坎德意识到，自己赢了这场黑洞战争。他写道：

量子场论是量子力学的特例，而量子力学中的信息永远不可能被摧毁。不管马尔达塞纳和威滕还做了什么，他们已经确定无疑地证明了黑洞视界内的信息绝不会消失。弦论物理学家马上就会搞清楚这件事情，广义相对论研究者可能还需要再花一段时间，但战争已经结束了。㊟

任何传递到黑洞内部的信息都可以通过对应的二元量子场论描述来重新获得，它只是随着霍金辐射跑出来消散了，但并没有消失。

不过，这一方法也有不少问题。马尔达塞纳的猜想中概括的对偶性所涉及的超弦理论存在于“反德西特空间”（anti-de Sitter space）中，德西特空间以荷兰物理学家威廉·德西特的名字命名。德西特在1917年给出了爱因斯坦引力场方程的一个解，这个解代表了一个不包含物质、时空呈指数膨胀的宇宙模型。我们可以认为这样的宇宙只包含暗能量，有一个正的宇宙学常数，因此其时空曲率为正。德西特空间中三角形的内角和超过180度，就像球面上的三角形一样。

在反德西特空间中，宇宙学常数为负值，时空曲率是负的，因此该空间中的三角形内角和小于180度。这是一种双曲宇宙，其形状就像一座马鞍。将物质注入双曲宇宙中，弯曲的时空会把它从边界推向中心。因此，马尔达塞纳的猜想有时也被称为“AdS/CFT对偶”，其中的AdS代表反德西特空间，CFT代表共形场论（conformal field theory），这是一类特殊的量子场论。

要承认的是，即使到如今，马尔达塞纳的猜想也还只是猜想。一种特定的超弦理论（我们并没有它成立的证据）与一种超对称的量子场论（我们也没有它成立的证据）之间的对偶，其本身就是未经证明的。康伦在他的书《为什么是弦论？》中承认：“这一对应的双方都还没有严格的数学上的定义。”㊟虽然这一对应已经“通过计算”被检验了很多次，但这并不能构成正式的证据。一些弦论研究者认为它属于一种“真实但未被证明”的事情。㊟

霍金并没有立刻认输。他找出了自己错误的原因，或者引用他2004年在都柏林的一场大会上的说法，“从某种角度看，双方都是对的”。[注]索恩仍表示怀疑，但普雷斯基尔接受了霍金输给他的赌注——一本棒球百科全书，“让普雷斯基尔从中自由获取他想要的信息”。然而，虽然萨斯坎德宣称自己赢了，霍金也履行了赌约，但关于黑洞的这个问题似乎还没有结束讨论。像波尔钦斯基这样的弦论物理学家并不接受萨斯坎德的论证，认为其论证的多个基础前提有问题。[注]

或许，要了解在黑洞中到底发生了什么，最终还是应该采用一种更好的方法。有没有可能，黑洞信息悖论只是广义相对论（其中时空是以连续的方式演生出来的）被应用在本质上是量子的空间中时人为带来的结果呢？也许它跟芝诺悖论没有什么两样，只是基于一些更奇特的物体，包裹了一层更奇异的语言而已。

在前一章中，我们看到圈量子宇宙学去掉了存在于一些宇宙模型中的大爆炸奇点。在圈量子引力理论中，我们仅仅假设不存在比一个面积量子更小的面积，也不存在一个比体积量子更小的体积（就好像量子力学要求不存在比单个光子更小的光量一样），奇点就乖乖消失了。圈量子宇宙学中的量子引力效应，尤其是导致大反弹的量子斥力，在时空曲率接近普朗克尺度的时候占据了主导，这一现象可能发生在宇宙半径缩小到普朗克长度的很久之前。

这并不一定意味着黑洞不可能完全蒸发。它可能经历一个反弹过程，我们接下来会讨论。或者，它不会留下奇点，而是会留下一个蒸发得很慢的量子区域（这是阿什特卡猜想的结果）。[注]

2014年，罗韦利和维多托（维多托如今在荷兰的奈梅亨大学工作）提出，或许黑洞并不会坍缩成核心的一个奇点，而是坍缩成一个所谓的普朗克星。[注]如果一个质量等于太阳质量的黑洞坍缩成一个普朗克星，它的半径大约只有10^{-10}厘米。这已经压缩得很厉害了——整个太

阳的质量被压缩到比一个原子还小的体积里，但这个尺度比普朗克长度还要大30个数量级。随着黑洞蒸发，它可能会产生一个很长的“脖子”，这样或许就可以将所有的量子信息藏在视界内，防止其丢失。

也许受量子引力效应的影响，黑洞并不会完全坍缩到消失，而是会反弹。假设有这么一个观察者能坐在一颗普朗克星的表面上观察，他会发现这个反弹的过程是极快的。但对于外界观察者而言，由于引力的时间延缓效应，这一反弹过程比宇宙如今的年龄还长。

现在，黑洞周围就有了两个视界。在黑洞发出霍金辐射时，外面的事件视界会收缩，让黑洞最终蒸发。但同样的机制会让普朗克星内部的视界膨胀。最终，两个视界互相接触，在这个时候，未从事件视界辐射出来的剩余的信息可以逃脱。信息并没有从宇宙中永久消失，悖论解决了。

当然，黑洞也可以由比太阳小得多的恒星生成。早期宇宙中由10^{12}千克[注]左右的质量生成的黑洞，如今应该已经开始蒸发并从普朗克星放射能量了。这类原初黑洞在死亡时会短暂地爆发出强烈的高能辐射，这时它的普朗克星放射出能量并迅速消失，这种辐射是黑洞死亡时留下的量子引力标记。

至今，有7个不同的卫星探测器捕捉到了波长极短的伽马射线暴（VSGRB）的特征信号，这些信号意味着它们可能来自这类原初黑洞。[注]有一种可能的迹象是一种特征性的被压平的红移–距离曲线：如今正在爆炸的原初黑洞一定会变得越来越小，发射出更高频率的辐射，这会在一定程度上弥补宇宙学红移。

当然，我们现在离测定这些辐射暴并分析它们是否来自普朗克星（如果真的存在）还很远，但至少罗韦利等人提出的这种解决信息悖论的办法给了我们追寻的目标，而不仅仅是做出设想。

1. Brian Greene,The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos,Allen Lane,London,2011,p.91.
2. Shamit Kachru,Renata Kallosh,Andrei Linde,and Sandip P.Trivedi,‘de Sitter Vacua in String Theory’,Physical Review D,68 (2003);arXiv:hep-th/0301240v2,10 February 2003.
3. Joe Polchinski,interview with Steve Nadis,6 February 2006,quoted in Shing-Tung Yao and Steve Nadis,The Shape of Inner Space: String Theory and the Geometry of the Universe’s Hidden Dimensions,Basic Books,New York,2010,p.234.
4. Jessie Shelton,Washington Taylor,and Brian Wecht,‘Generalized Flux Vacua’,Journal of High Energy Physics,02 (2007),095; arXiv:hep-th/0607015v2,11 August 2006.
5. Lee Smolin,The Trouble with Physics: The Rise of String Theory,the Fall of a Science,and What Comes Next,Penguin Books,London,2008,p.159.
6. L.Susskind,‘The Anthropic Landscape of String Theory’,arXiv:hepth/0302219v1,27 February 2003.See also The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design,Little,Brown,New York,2006.
7. 斯莫林相信自己是第一个将“景观”（landscape）这个术语引入宇宙学的人，他在自己的宇宙学自然选择理论中引入了“适应性景观”（fitness landscape ）这一概念，我们会在下一章详细讨论它。
8. Max Tegmark,Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality,Penguin Books,London,2015; see particularly pp.132–50.
9. 不幸的是，恩格勒特的比利时同事罗贝尔·布鲁（Robert Brout）于2011年5 月去世，而诺奖从不颁给去世的人。
10. Richard Feynman,in P.C.W.Davies and Julian Brown (eds),Superstrings: A Theory of Everything?,Cambridge University Press,Cambridge,UK,1988,p.194.
11. The citation reads: ‘For numerous deep and groundbreaking contributions to quantum field theory,quantum gravity,string theory and geometry.With Strominger ［Vafa］,their joint statistical derivation of the Bekenstein–Hawking area–entropy relation unified the laws of thermodynamics with the laws of black hole dynamics and revealed the holographic nature of quantum spacetime.’ See https://breakthroughprize.org/Laureates/1/L14
12. 这就是热成像的原理。
13. Stephen W.Hawking,A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes,Bantam Press,London,1988,p.105.
14. The Bekenstein–Hawking formula is actually $S=k_BA/4l_p^2$,where k_B is Boltzmann’s constant (1.38×10^{-23} joules per kelvin),A is the surface area of the black hole,and l_p is the Planck length (1.62×10^{-35} metres).

15. 不过这种辐射是非常小的。一个与太阳质量相当的黑洞，发出的辐射仅为绝对零度以上600 亿分之一度。它吸收的宇宙微波背景辐射都比它发出的辐射多。

16. Joseph Conlon,Why String Theory?,CRC Press,Boca Raton,FL,2016,p.184.

17. Ibid.,p.186.

18. Krasnov–Rovelli correspondence,1994–6.Personal communication,from Carlo Rovelli,7 August 2017.

19. 当时，这个电子预印本档案库由洛斯阿拉莫斯国家实验室主办。它在2001年迁移到康奈尔大学，成为后来我们熟知的arXiv网站。感谢特德·雅各布森向我指出这一点。

20. Version 1 of Krasnov's paper was uploaded to the preprint archive on 15 March 1996,but the details (and the title) were changed in version 2,and a third version was uploaded on 27 September 1996:Kirill Krasnov,'Counting Surface States in the Loop Quantum Gravity',Physical Review D,55 (1997),3505–13; arXiv:gr-qc/9603025v3,27 September 1996.Rovelli's paper was uploaded to the archive on 30 March 1996: Carlo Rovelli,'Black Hole Entropy from Loop Quantum Gravity',Physical Review Letters,77 (1996),3288; arXiv:grqc/9603063v1,30 March 1996.Rovelli's derivation and Krasnov's published version 3 derivation both give $S=k_BA/16\pi l_p^2$.

21. Lee Smolin,personal communication,21 July 2017.

22. Krasnov posted version 1 of his second paper on black hole entropy from Kiev on 21 May 1996 and the revision containing the derivation $S=(\ln 5)k_BA/8\pi\gamma\sqrt{2}l_p^2$ was uploaded from Penn State on 18 January 1997.A third version was uploaded on 20 June 1997.Kirill Krasnov,'On Quantum Statistical Mechanics of a Schwarzschild Black Hole',General Relativity and Gravitation,30 (1998),53–68; arXiv:gr-qc/9605047v3,20 June 1997.

23. A.Ashtekar,J.Baez,A.Corichi,and K.Krasnov,'Quantum Geometry and Black Hole Entropy',Physical Review Letters,80 (1998),904–7;arXiv:gr-qc/9710007v1,1 October 1997.

24. Krzysztof A.Meissner,'Black Hole Entropy in Loop Quantum Gravity',Classical and Quantum Gravity,21 (2004),5245; arXiv:gr- qc/0407052v1,14 July 2004.Meissner showed that the constant γ_0 can be deduced from the relationship $\sum_{k=1}^{\infty} 2e^{-2\pi\gamma_0\sqrt{k(k+2)}/4}=1$.The simplest way to solve this equation is to set it up in an Excel spreadsheet and use the 'goal seek' function to set the sum equal to 1 by changing the value of γ_0.You can run the range of values of k from 1 up to any number you like (obviously,infinity is a bit impractical),but the sum converges pretty quickly and with γ_0 set to 0.23753 it doesn't change significantly for values ofk greater than about 20.

25. Eugenio Bianchi,'Entropy of Non-extremal Black Holes from Loop Gravity',arXiv:gr-qc/1204.5122v1,23 April 2012.The approach to black hole entropy based on local horizon energy is described in Ernesto Frodden,Amit Ghosh,and Alejandro Perez,'Quasilocal First Law

for Black Hole Thermodynamics’,Physical Review D,87(2013),121503; arXiv:gr-qc/1110.4055v2,16 December 2011.

26. Carlo Rovelli,personal communication,21 June 2017.

27. 严格来讲，这些比特是量子比特（qubit ），因此惠勒这句话应该表述为“物质来自量子比特”。

28. John Archibald Wheeler,with Kenneth Ford,Geons,Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics,W.W.Norton,New York,1998,pp.340–1.

29. Ashtekar,et al.,‘Quantum Geometry and Black Hole Entropy’,p.7.

30. Leonard Susskind,The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics,Little,Brown,New York,2008,p.294.

31. Ibid.,p.419.

32. Joseph Conlon,Why String Theory?,CRC Press,Boca Raton,FL,2016,p.119.

33. ‘In summary,we see convincing reason to place AdS/CFT duality in the category of true but not proven,’ Gary T.Horowitz and Joseph Polchinksi,‘Gauge/gravity Duality’,in Daniele Oriti (ed.),Approaches to Quantum Gravity: Towards a New Understanding of Space,Time and Matter,Cambridge University Press,Cambridge,UK,2009,p.169;arXiv:gr-qc/0602037v3,18 April 2006,p.17.It’s fair to say that there are a few mathematical conjectures that are broadly accepted but remain unproven.However,these refer to relationships between mathematical concepts or objects which have some established validity.In their paper,Horowitz and Polchinski mention the Riemann hypothesis,one of the great unsolved problems in mathematics.But,without going into details,this hypothesis connects the distribution of zeros (a mathematically valid concept) in something called the Riemann zeta function (also mathematically valid).In contrast,the AdS/CFT duality is conjectured to be established between two theoretical structures,neither of which has any mathematical or scientific validity.

34. Stephen Hawking,quoted by John Baez,who was present at the 17th International Conference on General Relativity and Gravitation in Dublin; see http://math.ucr.edu/home/baez/week207.html

35. See,for example,Ahmed Almheiri,Donald Marolf,Joseph Polchinki,and James Sully,‘Black Holes: Complementarity or Firewalls?’,Journal of High Energy Physics,62 (2013); arXiv:hep-th/1207.3123v4,13 April 2013.

36. Abhay Ashtekar,personal communication,11 December 2017.

37. Carlo Rovelli and Francesca Vidotto,‘Planck Stars’,International Journal of Modern Physics D,23 (2014),1442026; arXiv:gr-qc/1401.6562v4,8 February 2014.

38. 太阳的质量约为2×1030 千克。

39. David B.Cline,Stanislaw Otwinowski,Bozena Czerny,and Agnieszka Janiuk,‘Do Very Short Gamma Ray Bursts Originate from Primordial Black Holes? Review’,International Journal of Astronomy and Astrophysics,1 (2011),164–72; arXiv:astro-ph/1105.5363v1,26 May 2011.

第16章 接近边缘——时间的本质与开放未来原理

“爸爸，”斯莫林的儿子问道，“你在我这么大的时候也叫我这个名字吗？”[注]

小孩子在某一个阶段总是对周围的世界展现无穷无尽的好奇，他们无休止地问父母各种问题，以尝试理解他们经历的一切。随着时间推移，这种好奇发展成对于自己如何融入万事万物的整体图像中的更宽泛的好奇。有时候他们的问题会让我们懊悔自己当年在生物课上为什么没有听得更仔细一些，还有一些问题则会让我们陷入既深刻又个人化的哲学思考。

儿子天真的问题让斯莫林怔住了。量子引力理论中无处不在的数学结构会不可避免地让我们得出这样的结论：时间是幻觉。我们不得不认为，它是一项演生出来的、相对的性质，由一系列有因果关系的时刻序列组装而成，就像电影一样：一系列静止的图像快速地从我们眼前闪过，让我们产生了画面在动的幻觉。

然而，这个不懂过去400年的物理学知识的孩童问出的这个天真幼稚的问题，揭示了一个更为深刻的真相。斯莫林的儿子很清楚，在自己出生之前时间也存在，他好奇那个时候发生了什么。

不管数学结构表达了怎样的含义，毫无疑问，我们都经历着时间的流逝。随着我们年纪变大，年少时仿佛永无止境的夏日在记忆中褪色，整年的时光中各种各样的经历都淡去了。“然后有一天你会发现，10年的时光都已在你身后。”[注]我们看到照片的时候会微笑，然后停下来扪心自问：照片上的情景真的已经是10年（或者20年、30年）之前了吗？

但在过去的一个世纪中，物理学告诉我们，时间不是这样的。我们

也已明白，我们人类在大尺度下的经验并不能用来理解小尺度的现象。在学生时期和刚当上研究员的时候，斯莫林并不排斥时间的不真实性，因为这符合他青春期时的梦想。被时间所束缚的人类事务组成的世界既丑陋又冷漠，而物理世界中永恒的真理给了他逃离的可能。

但之后，人生的种种遭遇接踵而至，世界看起来又没有那么糟糕了。

斯莫林的主要经历是尝试把圈与弦结合起来（这一尝试并不那么成功），并完成圈量子引力理论的构建。这让他开始接受更加尊重时间与因果性的方法，例如马科普洛的因果自旋泡沫，以及由德国理论物理学家雷娜特·罗尔及其同事创立的因果动态三角剖分理论。斯莫林越发关注“自然定律”的起源与状态，并持续思考与量子力学看似内在的非局域性相关的问题。

这些影响共同造就了一个更年长、更睿智的斯莫林。在进行了一番真挚的自我反省之后，他有了一个想法，这个想法哪怕不是革命性的，至少也是很激进的：如果时间是真实的，会怎么样？

斯莫林的弟弟戴维是美国阿拉巴马州伯明翰的坎伯兰法学院的法学教授，斯莫林从他的弟弟那里听说了巴西裔美国哲学家、法学理论家与政治家罗伯托·曼加贝拉·昂格尔（Roberto Mangabeira Unger）。昂格尔在哈佛法学院当了几十年的教授，在法学圈里以20世纪七八十年代对批判法学研究运动的贡献而知名。1985年，他支持的巴西在经历了20年的军事独裁之后转变为民主国家，他本人还在时任巴西总统路易斯·伊纳西奥·卢拉·达席尔瓦（Luiz Inácio Lula da Silva）自2007年起的第二个任期里担任了两年的战略关系部长。2015年2月，时任巴西总统迪尔玛·鲁斯夫（Dilma Rousseff）又邀请他担任了同一个职位，但9个月之后这位总统就被弹劾下台。

斯莫林在耶鲁工作时就听过昂格尔关于法学理论的讲座。说起昂格

尔，他表示：“他真是光芒万丈。”[注]碰巧的是，昂格尔对于时间的观念与斯莫林相似，几年之后他们就开始合作了。

两人的合作孕育了两本书：一本是斯莫林写的简要的大众科学书，即2013年出版的《时间重生》；另一本是两人合著的《奇异宇宙与时间现实》（*The Singular Universe and the Reality of Time*），出版于2015年，面向更专业的读者。《时间重生》为加拿大剧作家汉娜·莫斯科维奇（Hannah Moscovitch）的戏剧《无穷》（*Infinity*）提供了灵感，这场戏于2015年3月在多伦多首次上演，斯莫林也参与了剧本创作。

斯莫林乐于用写作来整理作为一名专业的科学家所面临的艰深问题。但他自己承认，《时间重生》“写起来相当令人畏惧”。[注]

为了更好地感受这一想法激进在哪里，我们有必要先了解一下物理学是如何完全失去对时间的控制的。在《时间重生》的开头几章中，斯莫林沿着历史一直追溯到伽利略时期。时间的衰落，与我们开始用测量（尤其是数学）作为语言来描述自然重合，这或许并不让人感到惊讶。

1638年，软禁中的伽利略出版了《关于力学和局部运动两门新科学的对话和数学证明》（简称《两门新科学》）。在讨论抛射物体运动的部分，他考虑了初始状态做匀速水平运动的物体（如从城堡护墙上发出的一颗炮弹）。物体被抛出以后，就结合了引力导致的向下的加速运动，因此一边向前运动一边下落。伽利略想讨论的问题是：这样的物体在空中的轨迹是什么样的？

在定理1的命题1中，他写道：

> 同理，我们可以证明，如果我们取任意大小的相等时间间隔，并想象（物体）进行着一种类似的复合运动，那么在每个时间间隔的结尾，它都会落在同一条抛物线上面。[注]

当然，这些我们如今都知道了。如果一个物体在水平方向做匀速运动，每个时间间隔t里在水平方向上走过相同的距离，而在竖直方向上走过的距离正比于t^2，那么物体划出的轨迹就是一条抛物线。

这一切看起来很自然，也许你会不解为什么我要特意提到平抛运动。但想想伽利略在这个问题上做了什么：他把物理现实（空间和时间）抽象化，使其变成几何元素（如图29所示）。对于空间来说，这没什么问题，至少空间具有某种意义上的恒久性——不管空间中的物体怎么来来去去，在经典牛顿力学中，空间本身都不会发生根本性的变化。但对时间来说就不一样了：时间不是恒久不变的，它会发生变化。当我们按顺序记录相隔一定时间间隔的一系列测量结果时，我们需要把时间“冻结”以进行进一步观察。斯莫林解释道：“这种冻结时间的方法一直以来都很成功，以至于大多数物理学家都没有意识到他们在理解大自然的过程中运用了这么一个技巧。”(注)

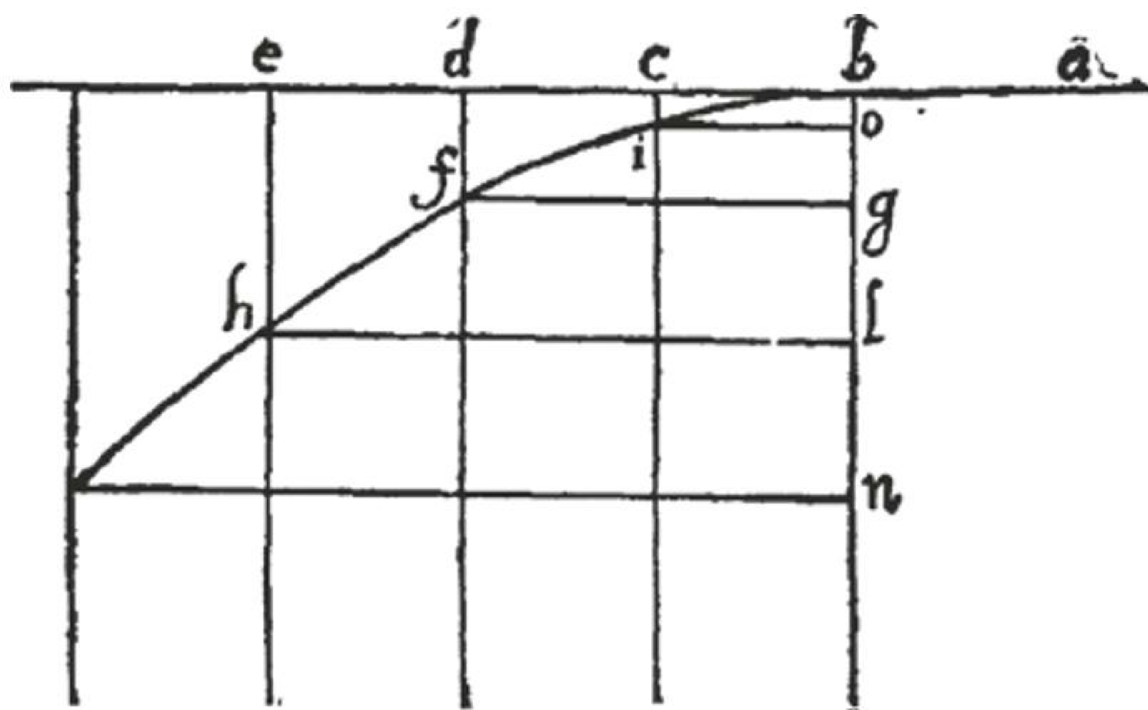


图29 这张图是伽利略《两门新科学》中的插图，他抓住了物理实体中的元素——空间和时间，并把它们变成了几何元素，以均匀的时间间隔作为横轴，以空间的距离（高度）作为纵轴。他写道：“沿着ab方向画延长线be代表时间的流逝，或者说作

为时间的测量标准；把这条线分成一系列线段bc、cd、de，这些线段各自代表相等的时间间隔。”

好吧，让我们接受这一事实：类似伽利略所做的这种事情包含了抽象化的过程，而我们对这个过程过于熟悉，根本意识不到它的本质和程度。不过，即使考虑到这一点，时间与空间在很大程度上仍然是分离的。如果使用笛卡儿发明的坐标系，我们会用x、y和z三个坐标轴来表示三维空间，但我们还需要有一个t轴：时间也是一个几何维度，同样被测量与数学主宰，它还没有完全消失。

在我们对物体运动的表述中确实还含有时间，但请不要忘记，我们最终要面对的是背后决定物体在时间与空间中轨迹的定律。这些定律被称为牛顿运动定律和万有引力定律，它们是不随时间而改变的。这些定律中可能含有t，但它们是定律：它们永远成立，岿然不动。

把时间向前快进几百年，牛顿的绝对时空观被爱因斯坦的相对论代替，“同时性”的概念失去了意义。闵可夫斯基让空间和时间各自变成四维时空中的投影，时间也是其中的一个维度，而宇宙就像一块石头一样恒久不变。(注)爱因斯坦又将时空变为弯曲的几何形状。随后，正如我们在第6章中看到的那样，对发展正则量子引力理论的尝试得出了这样一个结论，即把时间看成一系列定格时刻按顺序相连的结果。

为了从圈量子引力理论中还原出物理的时间，我们得先选择一种方式，让时间从这些瞬间中演生出来。我们假设时间是从自旋网络的动态演化（称为自旋泡沫）中演生出来的，时间的幻影则来自空间原子之间不断变化的关系。在圈量子宇宙学中，我们可以规定一个任意的场来作为时间的代理者，或者直接发展自旋泡沫宇宙学。

斯莫林指出，所有这些举动都是因为我们相信物理学的目的是找出关于宇宙的永恒的真理，即寻找一个永恒不变的数学定律、方程或者理论，它能告诉我们宇宙从哪里来，又是怎样运作的。“这一思考习惯对

我们来说太过稀松平常，以至于我们忽视了它有多荒谬。”斯莫林说。如果这个方程要描述整个宇宙的方方面面，它就必须从宇宙之外来构造，这么想就相当于又回到了“上帝视角”。爱因斯坦曾经尝试把尺子和时钟放到宇宙里面，以此摒弃“上帝视角”。“如果宇宙就是所有存在的东西，那又怎么可能在它之外还存在一个用来描述它的东西呢？”[注]

我们很容易忘记，17至18世纪建立了我们如今科学世界观的机械主义哲学家是何等坚信，他们研究的目的其实是揭开上帝的创造是多么精巧。如今，我们可能会礼貌地忽视牛顿在1713年出版的《自然哲学的数学原理》第二版第三卷靠近末尾处的注释中关于上帝本质的长篇累牍的讨论：“关于上帝而言就是这些，从现象研究他，从属于自然哲学。”[注][注]

好吧，但这毕竟是300年前的事情了，从那时候到现在，科学必定进步了不少吧？但我们要知道，爱因斯坦的“上帝不掷骰子”这句话可不是白说的，他确实相信有一个“上帝”存在，虽然不是《圣经》里的那个上帝。霍金在《时间简史》的结尾处评论道：“如果我们找到了答案（指完备的理论），那将是人类理性的终极胜利——因为那时我们知道了上帝的思想。”[注]在《终极理论之梦》中，史蒂文·温伯格把整整一章的篇幅贡献给了上帝，他写道：“如果大自然中存在什么东西，它能赋予我们一种独特的洞察力来理解上帝的创造，那么一定是自然的终极法则。”[注]需要指出的是，温伯格随后又以这样的语句结尾：“从历史经验判断，我会推测，虽然我们会从自然的终极法则中找到美，但我们不会找到……任何证据显示上帝在意这些事情。或许会有别的事情显示上帝的意志，但自然法则不会。”[注]

今天，极少有理论物理学家会公开承认他们在寻找上帝（至少在自己已经有一定学术地位或者获得诺贝尔奖之前不会这么做）。但大多数人都会乐于承认他们在进行一种精神探索，追寻着比他们自身——甚至比整个宇宙——更伟大的永恒的真相。当然，这是人类精神的一部分，

但我们得搞清楚，从事这样的追求，需要我们做出某种昂格尔所说的“形而上学的预先承诺”（metaphysical precommitment）。(注)

这样的预先承诺，驱使一些理论物理学家思考（不管他们有没有意识到）“自然科学中数学的不合理的有效性”(注)，或者可以简单解释成感性地追寻物理学中的数学之美。这种倾向走向极端，就成了泰格马克的数学宇宙假说——现实是永恒不变的数学结构。这类想法提升了数学的地位，把它放在一个崇高的位置上，却让我们无法看到它真正的本质——它是人类发明的一种有力而有效的工具（对我来说是这样），可以用于描述并发现自然中的模式。当我们感受到数学之美时，我认为我们真正感受到的其实是自然本身的美。

话题到这儿就太深了。斯莫林和昂格尔正在打破游戏规则，挑战我们物理学在近400年间赖以发展的基础。他们倡导另一种形而上学的预先承诺，希望借此在物理宇宙学领域发起一场新的革命。

如今，“革命”常指不同想法或理想之间的交锋。自美国哲学家托马斯·库恩（Thomas Kuhn）出版《科学革命的结构》（*The Structure of Scientific Revolutions*）一书以来，我们倾向于把这样的想法或理想称为“范式”。从某种方面来说，圈量子引力理论也算是一场革命（虽然革命性或许不是那么特别强），至少在20世纪八九十年代该理论的基础被奠定的时候是这样的。在典型情况下，当交锋结束，其中一种理论取得了某种胜利时，该理论就需要开始在已有的基础上建立新的秩序，这意味着接受新范式的隐藏含义，解决更小的问题，以建立更持久的结构。库恩认为，这个过程需要所谓的“常规科学”，即通过实用主义和坚持不懈的精神解决小问题。

跨过革命的枪林弹雨之后，罗韦利欣然接受了在量子引力领域的混乱现状中建立秩序的挑战。“我喜欢洗碗，”他对英国记者布赖恩·阿普尔亚德（Bryan Appleyard）说，“一开始一切都乱七八糟，但我集中精

力对付它们，让思想自由驰骋之后，过不了多久它们就回归了干净整洁的状态。”(注)

这也是为什么罗韦利要澄清自己在量子力学诠释问题上的立场（我们在第13章中描述过）。如果量子力学从某种意义上说是不完备的，那我们怎样才能以它为基础建立一个量子引力理论呢？要让建立一个持久的理论成为可能，罗韦利首先要避免卷入关于量子实在性和量子力学完备性等问题的无休止的争论。他要开始“洗碗”了。

他以自己的勤奋写成了一本专业书，名为《量子引力》（*Quantum Gravity*），由剑桥大学出版社在2004年出版，当时他觉得自己已经清楚地理解了量子引力的基础。从各方面看，这本书都是他对该领域的重大贡献：它深刻讨论了如何理解量子空间和量子时间。书的整个前半段重新审视了基础经典力学、量子力学和广义相对论，不过是以量子引力表述的全新角度来讨论的。这本书解释了这样一个不把时间演化当作基本概念的理论是如何起作用的。(注)

然而，斯莫林仍然身处革命之中，他还在战斗。革命者受到强烈的动力驱动，要摧毁现有的秩序，这样才能建立新的、更好的秩序。在准备扔出下一枚燃烧弹的时候，他敦促我们重新思考时间的本质。

一切选择都有后果。要成为一个有远见的人，你可能就需要把船驶到非常接近卡律布狄斯旋涡（形而上学谬论）的地方。在这样的情况下，你最应该做的只有通过望远镜密切观察经验主义的岩石浅滩，并期待最好的结果。

在调研哪些研究人员能来新成立的圆周理论物理研究所工作的时候，霍华德·伯顿发现理论物理学家可以分成两大类：

一类是一丝不苟的计算器，在反反复复地检查完之前绝不会透露一丝结果；另一类是疯狂的思想者，沉迷于描绘离谱的理论。如果第一类

人公布了一个结果，那么你可以确信这个结果是对的，但完全不能确信它是有趣的；而如果第二类人公布了一个结果，那么你可以确信这个结果是有趣的，但完全不能确信它是对的。[注]

伯顿确信斯莫林属于第二类理论物理学家。当然，不是说斯莫林从来不洗碗（他的妻子迪娜作证说他经常洗碗），也不是说他不如罗韦利爱洗碗。但斯莫林身上蕴藏着一种不安分的能量，他的大脑里总是充斥着各种各样新奇的想法，他的眼睛总关注着能够探进物理学意义的最深洞穴里的问题。

先澄清一点，斯莫林和昂格尔并不认为我们应当摒弃当今的物理学定律，完全不这样认为。他们的观点是，我们需要意识到，物理学定律的适用范围仍然是很窄的。如果认为物理学定律能被用在整个宇宙上，我们就犯错了，他们称之为宇宙学谬误（cosmological fallacy）。

实际上，根据我们如今对物理学定律的了解，它们远没有某些理论物理学家尝试让你相信的那么宏大。仔细看的话，我们就会发现：不管它们看起来多科学，它们总是理想化的。正因为它们是理想化的，它们永远不可能以孤立的方式被检验。每当我们想把一条定律应用到实际情况中的时候，我们都需要简化条件，以将注意力集中在重要的现象上。斯莫林将这一举动称为研究“盒子里的物理学”。

为了简化条件，我们就需要做近似，或者引入科学哲学家所说的辅助假说。简单来说（这也是很明显的），这相当于为了检验一个更简单、更可被理解的模型而忽视大自然复杂的方面，例如在研究电磁学的时候忽视引力效应。就像是斯莫林写的那样：“牛顿第一定律称，所有自由粒子都会沿直线运动。这条定律已经被检验并验证了无数次，但每次检验都包含近似的过程，因为没有哪个粒子是真正完全自由运动的。”[注]

因此，在这些情况下，我们检验的不是定律本身，而是包裹在一系

列辅助假说之中的定律。如果一项观测或者实验检验得到了否定的结果，科学家的第一反应是考虑是不是哪个辅助假说出了问题，而非质疑定律本身的正确性（毕竟，定律被认为是永恒不变的）。[注]

这一问题并没有让物理学完全停滞不前。[注]研究盒子里的物理学意味着把宇宙的一部分隔离出来，让我们感兴趣的事情在盒子里面发生（按照一种基于时间间隔*t*的表示法），并假设盒子外面宇宙的其他部分表现得像某种永恒的背景，就好像有一座舞台让物理学的演员们在上面踱步。斯莫林和昂格尔认为，当我们发展宇宙学理论的时候，这种方法就不适用了。

把时间看作幻影，让我们陷入了一系列宇宙学难题之中。我们无法解释为什么物理学定律采取了我们所见的形式，也不能精确地判定主宰宇宙最早期状态的初始条件，只能思索日益恼人的物理学定律精细调节问题，或者直接弃船逃生，奔向弦论景观、永恒暴胀或者多宇宙。

在这种情况下，物理学该如何前进呢？

斯莫林和昂格尔采用了爱因斯坦在1905年用过的方法。[注]为什么不干脆假设只存在一个宇宙，而且时间是真实的，再探索其结果呢？这有多难？

至少有一件事是清楚明白的。“如果相反，时间是完全真实的，”斯莫林引用了昂格尔的话，他写道，“那么没有任何一种东西是可以永恒存在的，包括定律本身……它们必定要演化。”[注]

时间在物理学定律存在之前就出现了。

也许令人感到惊讶的是，想象物理学会随着时间变化其实并没有那么难。圈量子宇宙学消除了大爆炸奇点，这意味着在我们的宇宙出现之前还存在一个宇宙。如果物理学定律不是在反弹的一瞬间被完全重设，

而是被随机地轻微调整了，我们就能理解物理学定律是如何在不断重复的反弹、膨胀、收缩和反弹周期间随着时间演化的了。

但我们也看到，这一周期性的圈量子宇宙学模型仍然需要假设宇宙暴胀存在。况且，尽管它消除了解决初始条件问题的压力，它也没有完全解决初始条件问题。当然，也存在其他的周期性宇宙学模型，可以既消除大爆炸奇点也不必引入暴胀。其中一个模型于2001年由普林斯顿大学理论物理学家保罗·斯坦哈特（Paul Steinhardt）、贾斯廷·库利（Justin Khoury）与宾夕法尼亚大学的伯特·奥夫鲁特（Burt Ovrut），以及当时在英国剑桥大学的尼尔·图罗克（Neil Turok，现在在圆周理论物理研究所工作）合作提出。该理论基于M理论的膜之间的碰撞，认为碰撞产生的一小部分能量转化为热辐射，表现为我们认为的大爆炸，它无须暴胀就能让宇宙加速膨胀。膜与膜之间碰撞并反弹，但不会相距太远，因此它们仍然能受到彼此的引力。数万亿年后，膜再次碰撞，宇宙重启，进入下一周期。

既然这一模型无须引入暴胀，也就不会有原初引力波了。但正如一句俗话所说，没找到某一事物存在的证据，并不能证明这一事物不存在，我们如今还没有找到原初引力波，不代表以后也不会找到。周期性模型还预言宇宙背景辐射的温度变异并非完全随机。我在第14章中提到过，重新分析了最近普朗克卫星的数据之后，斯坦哈特与同事安娜·伊尧什（Anna Ijjas）和亚伯拉罕·勒布（Abraham Loeb）宣称，这些数据强力驳斥了最简单的暴胀模型。[注]

说这件事尚无定论，或许并不过分。确实，如果不事先假设时间是真实的，这类周期性宇宙模型就并没有多大意义。斯坦哈特和图罗克指出，周期性宇宙模型总是把宇宙拉入同样的初始条件中：“在背后驱动周期的机制是温和的，而且能自我调节……因此这一模型是简单而俭省的。几乎每一块宇宙都会产生星系、恒星、行星和生命，周而复始地循环着。”[注]然而，如果每次碰撞都会以随机的方式重设定律和初始条件

——如我们所预期的那样，那么我们很难解释为什么每个周期都能得到我们需要的这个宇宙。(注)

我们需要的是一个机械的模型，它能不可避免地把宇宙引向主宰我们如今所在宇宙的看似复杂的定律和初始条件。斯莫林在他1997年出版的第一本书《宇宙的生命》（*Life of the Cosmos*）中描述了这样的一个模型（来自他在此之前5年发表的想法），他称之为“宇宙学自然选择”。这个模型中包含周期循环，但并不属于周期宇宙学。它认为，我们宇宙中的黑洞自身就是产生整个崭新时空区域（新宇宙）的种子。

在圈量子宇宙学中，宇宙的母体是大反弹之前存在的一个坍缩的宇宙。而在宇宙学自然选择模型中，宇宙的母体是前一个宇宙中的黑洞，黑洞反弹后产生了宇宙。

这样看来，一个“典型”的宇宙的母体，可能会产生很多个后代宇宙（因为宇宙中有很多黑洞）。就像地球上的生命是通过随机的基因突变和自然选择演化而来的一样，随着时间推移，宇宙也进入了一种自我持续的模式，以使产生的黑洞数量最大化。

如果在每个黑洞反弹的时候，其物理学定律都会随机地发生轻微突变（比如基本粒子的质量有微小的不同，或者作用力的强度有细微的差异），那么宇宙学自然选择会让新的宇宙不断产生，创造合适的条件让产生的黑洞数量最大化。而据我们所知，让产生的黑洞数量最大化，需要的条件正是如今这个宇宙的初始条件：能产生我们熟悉的基本粒子、原子、恒星、星系和主宰所有这一切的性质与行为的基本物理定律的初始条件。“还有一个意外收获：这个模型通过假设宇宙为产生尽可能多的黑洞而生，同时解释了为什么这个宇宙中会存在生命。”(注)那么，为什么不跳过中间过程，直接演化出原初黑洞最多的宇宙呢？因为这样的宇宙太小了。通过恒星的引力坍缩产生黑洞的宇宙会大得多，因此可以产生更多的黑洞。

这个猜测简直是异想天开，离卡律布狄斯旋涡已经很近了。这是另一种多宇宙理论。与永恒暴胀和弦论景观不同的是，在这一理论中，所有不同的宇宙都有相似的血统，它们都演化出了对生命友好的结构，因此我们无须诉诸人择原理。

斯莫林还称，与人择多重宇宙的倡导者不同的是，他并没有弃船逃生。他相信宇宙学自然选择模型是可以被检验的。如果宇宙确实是向着能产生最多黑洞的方向演化的，那么这种倾向会在宇宙暴胀的方式上留下痕迹（前提是宇宙暴胀确实发生了），可能还会在宇宙学常数的值上留下痕迹。这一模型或许还会为中子星质量范围设置一个更严格的上限。

典型的中子星大概拥有相当于太阳质量的1.4倍的质量，其半径约为11千米。它由中子、质子和电子组成，中子与质子数目之比至少为200∶1。它可能还拥有一个K介子组成的核。K介子是质子和中子的“亲戚”，不过更为少见，是质子或中子中的一个下夸克被替换成奇异夸克组成的。中子星不都是脉冲星，但大多数都是。

如果一个宇宙中的物理学定律都能被演化过程精细调节以产生数量最多的黑洞，中子星的质量就会有一个上限，斯莫林估计这个上限为2个太阳质量。这就是一项预测。如果我们观测到比2个太阳质量重得多的中子星，就会重创宇宙学自然选择理论。

最近（2013年），纽约石溪大学的詹姆斯·拉蒂默（James Lattimer）在一篇综述中将已精确测量的最大的中子星质量定为1.97±0.04个太阳质量。但有两颗所谓的X射线脉冲星PSR B1957+20（它有一个吓人的名字叫“黑寡妇脉冲星”，因为它在吸取来自其伴星的物质）和4U1700–377，观测表明两者的质量都达到2.4个太阳质量。不幸的是，对X射线脉冲星质量的观测存在很大的固有误差，因此这些数据不能作为决定性证据。(注)

如果更精确的数据最终表明这两颗脉冲星的质量小于2个太阳质量的阈值，也不能真正证明什么，因为有好几个已被接受的核物理理论都与这样的结果一致。然而，如果2.4个太阳质量的结果被证实了，斯莫林的理论就被排除了，还有一些要用到基于夸克的奇异的物质态的理论也会受到威胁。㊟我觉得我们只能拭目以待。

或许对时间的真实性带来最大威胁的想法是斯莫林和昂格尔所说的“元定律困境”（meta-law dilemma）。如果大自然的定律会演化，这岂不是意味着有一个元定律在支配着它们的演化？否则，在大自然的定律被“锁死”之前，基本粒子和它们之间的相互作用力是怎么知道要怎么做的呢？而如果存在这么一条大自然的元定律，我们又得思考了：为什么是这条元定律呢？

在第14章中，我解释了氢原子中电子的最低能级的轨道由一个球面波函数表示。这个波函数给出了电子的量子统计概率分布，其峰值位于玻尔半径处。“如果你在50年前制备了一个氢原子，那么不管你是当时观测电子，还是现在观测电子，得到的统计分布都是相同的；而且你很确信，哪怕再过100年才观测，得到的仍然是同一个统计分布。”㊟这样一来，我们就能得出结论：主宰质子与电子之间的静电力的库仑定律是一条不随着时间改变的自然定律。

斯莫林认为，我们这么想过度诠释了已有的证据，他呼吁我们遵循一种先例原则。在英美法系中，法律系统的运行不只依赖政府写在法典里的法律条文，也包含法官和法庭的裁决，亦称习惯法。对于一项从未有过先例而又与任何此前的案例差异极大的法律争端，法官的判决会建立一个先例，从而为未来的判决提供指引。

很明显，宇宙中最初出现的物理相互作用是没有先例的。如果我们再进一步假设它们并没有受某种预先决定的定律主导，我们就可以想象出这样的一个场景：初始的相互作用完全靠碰运气，产生了在某个范围

内的各种各样的结果。只有在基本粒子（不管它们是什么）以及它们之间的相互作用确定之后，相关先例才建立了起来。自然是在实践中学习的。

法官的习惯法判决会被写在法庭审理程序记录里，此外还有很多实况报道、法律重述和百科全书（如美国的《美国法律百科全书》），通过这种方式，过去被建立的习惯法得以影响未来的判决。

根据类比，斯莫林的先例原则也需要某种机制，让过去的相互作用产生的结果能够被未来的相互作用所“采用”。“这就需要一种新的相互作用，”斯莫林写道，“让一个物理系统可以与自己在过去的拷贝相互作用。”(注)

在探索这样的机制如何作用的过程中，斯莫林发现了一种全新的非局域隐变量量子力学诠释，他称为“真实系综诠释”（real ensemble interpretation）。(注)之所以叫这个名字，是因为这一诠释假设量子物体的态是真实的（并不只是已编码信息的表达式），而且这些态的实体会发生集体的相互作用，就像一组音乐家组成的合奏组(注)一样。

假设我们设计了一个实验来测量氢原子中电子的位置。我们进行了一次测量，发现电子处于玻尔半径之外一点点的位置（见第14章的图26）。我们重复测量一次，发现这次电子在玻尔半径里面一点点。我们可能由此推断，在两次测量之间，电子向靠近核的方向移动了。但是在真实系综诠释中，斯莫林认为我们得到的结果是由宇宙中所有原子的亚系统（系综）复制而来的，其中的电子要么处于玻尔半径之外一点点的位置，要么在玻尔半径里面一点点。

我们继续测量，产生的结果可以用一个峰值位于玻尔半径处的量子概率分布来解释。但我们真正得到的是每个系综中氢原子数目的分布。在整个宇宙中，电子位于玻尔半径处的氢原子数目要多于电子位于其他位置的氢原子数目，因此这样的态被复制得更频繁。

以上推论让我们开始设想高度非局域性的复制过程是怎样进行的。当然，我们已经有了一个答案了。在第13章中我解释过，动态格子中的点之间可能会有非局域性的连接，代表自旋网络的演生空间。一个被测量的氢原子就通过这样的非局域性连接与系综中的其他成员相连。复制再次在空间“之下”发生了。

假设这类相互作用会发生，那么先例就会一次又一次地重复发生，这样我们就得到了量子统计分布。在卢西恩·哈迪（Lucien Hardy）、路易·马萨内斯（Llúis Masanes）和马库斯·米勒（Markus Müller）此前发表的想法基础上，斯莫林设想，元定律的运行或许驱动了这些重复的结果形成一组简单的“规则”，它们能将重复结果所需要的信息量降到最低程度。随着时间推移，这些规则稳定下来，成为主宰物质、辐射和时空性质及行为的定律。

如果所有这些想法都是对的，那么，通过在实验室中创造奇异的量子态，我们就创造了一个完全没有先例的系统。大自然没有任何历史上的先例可以用来决定该做什么，而对这类态的任何测量结果都应该是完全无法预测的。然而，这样的实验会很难解释，因为如果仪器没有正确地设置好，也会产生无法预测的完全随机的结果。因此，经验丰富的实验科学家会选择重复测量，消除初始设置中一切可能出现的问题（他们通常还会寻找更可预测并且可重复的结果）。到这个时候，先例原理就已完成它的使命。

不仅如此，时间的真实性还要求我们重新诠释广义相对论，因为在广义相对论中时间被物理形状的相对性代替了。如果时间是真实的，那么或许空间才是幻影，正如因果动态三角剖分和量子引力图论（quantum graphity）这些理论所认为的那样。

这并不意味着斯莫林已经抛弃了他倾注了如此长的职业生涯的理论。这意味着，他把量子引力理论看作某种垫脚石，它并不会解决斯莫林认为与量子力学本质上的不完备性相关的深刻问题（因为它不能解

决），它也不会在某种极限下产生广义相对论（因为目前看来它还不能），除了在“盒子中的物理学”的情况下以外。

可以确定的是，所有这些认为时间真实的模型都还处于推测阶段，它们产生的问题比能得到的答案多：“在我们可以推断它们有可能成为实际的理论之前……还有很多工作要做。”斯莫林写道。注但目前毕竟还是早期阶段。在物理学400年的发展中已经根深蒂固的形而上学的预先承诺，不是能那么轻易就推翻的。

当基于现有证据的理性论证足够做出判断时，我们就可以得出结论。而当证据不足（即物理宇宙学面临的现状）时，斯莫林认为，物理学界应当鼓励大家提出广泛而多样的猜想，并为之寻找证据，这样我们才有可能得出结论，至少在原则上如此。

这就是斯莫林所说的开放未来原理（principles of the open future）。“在寻求发展这门新的科学的过程中，我们会发现，成功与否是可以通过宇宙学的未来在何种程度上变成未来的宇宙学来衡量的。”注

---

1. Lee Smolin,Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe,Penguin Books,London,2014,p.xiii.
2. ‘Time’,Dark Side of the Moon,by Pink Floyd,first released on 1 March 1973 (over forty years ago!).
3. Lee Smolin,personal communication,13 July 2017.
4. Lee Smolin,‘Time Reborn’,Perimeter Institute Public Lecture,3 April 2013.Available at http://www.perimeterinstitute.ca/videos/time-reborn
5. Galileo Galilei,Dialogues Concerning Two New Sciences,trans.Henry Crew and Alfonso de Salvio,Macmillan,New York,1914,pp.249–50.
6. Smolin,Time Reborn,p.30.
7. Despite Minkowski’s 1908 statements,Einstein was at pains to stress that spacetime doesn’t necessarily involve the ‘geometrization’ of time.A spacetime metric has a signature: time enters with a different sign when compared with spatial coordinates.In a three-dimensional Euclidean

space,if the positions are $l_1=x_1y_1z_1$ and $l_2=x_2y_2z_2$,the spatial interval $\Delta l=l_2–l_1$ can be found by applying Pythagoras'theorem: $\Delta l^2=\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2$.This 'distance function' is often referred to as a metric.It has an important property: no matter how we define the coordinate system (no matter how we definx,y,and z),the metric will always be the same (mathematicians say that it is'invariant').When we extend Euclidean space to include a fourth dimension of time,we must ensure that the resulting spacetime metric is likewise invariant.This means that we need a structure such as $\Delta s^2=\Delta(ct)^2–\Delta x^2–\Delta y^2–\Delta z^2$,where s is a generalized spacetime interval,t is time and c is the speed of light.This metric has the signature '+——'.We could swop these around and defineΔs2 such that the time interval is negative and the spatial intervals are positive(with a signature '–+++')—so long as these are of opposite sign Δs2 is invariant.The choice of signs is then simply a matter of convention.

8. Smolin,Time Reborn,p.xvi.

9. 摘自《自然哲学的数学原理》，牛顿著，赵振江译，商务印书馆，2006 。——译者注

10. Isaac Newton,Mathematical Principles of Natural Philosophy,first American edition,trans.Andrew Motte,published by Daniel Adee,New York,1845,p.506.

11. Stephen W.Hawking,A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes,Bantam Press,London,1988,p.175.

12. Steven Weinberg,Dreams of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature,Vintage,London,1993,p.193.

13. Ibid.,p.200.

14. In Roberto Mangeibera Unger and Lee Smolin,The Singular Universe and the Reality of Time,Cambridge University Press,Cambridge,UK,2015,p.163,Unger writes: 'What physics has found about the workings of nature must be laboriously separated from the metaphysical pre-commitments in the light of which the significance of these findings is commonly interpreted.

15. Eugene Wigner,'The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences' was the title of Wigner's Richard Courant lecture in mathematical sciences delivered at New York University on 11 May,1959.It was published in Communications on Pure and Applied Mathematics,13 (1960) 1–14.

16. Carlo Rovelli,quoted by Bryan Appleyard,'Physics Made Easy',Sunday Times Magazine,11 June 2017,p.16.

17. 在这本书的写作过程中，罗韦利把他关于时间本质的想法写成了一本科普书，叫作《时间的秩序》（The Order of Time ）。

18. Howard Burton,First Principles: The Crazy Business of Doing Serious Science,Key Porter Books,Toronto,2009,p.100.

19. Smolin,Time Reborn,p.100.

20. For a good antidote to the metaphysical pre-commitment to the notion of immutable laws of nature,I strongly recommend Nancy Cartwright,How the Laws of Physics Lie,Oxford University Press,Oxford,1983.

21. When the planet Uranus was discovered by William Herschel in 1781,Newton’s laws of motion and the inverse-square law of gravitation could not account for its orbit.The response was not to reject the laws as false,but rather to ‘save the phenomena’ by hypothesizing an as-yet unobserved planet beyond Uranus.The planet Neptune was duly discovered in 1846 by the German astronomer Johann Galle,less than one degree from its predicted position.But when the same trick was attempted to explain the anomalous advance in the perihelion of Mercury—by hypothesizing an as-yet unobserved planet closer to the Sun (called Vulcan)—no such planet could be found.When confronted by potentially falsifying data,either the law itself or at least one of the auxiliary hypotheses required to apply it must be modified,but the observation or experiment cannot tell us which.In the latter case it was Newton’s law of gravitation that was at fault.And so one law was replaced with another,and the game started over.

22. When faced with the puzzle of reconciling Maxwell’s wave theory of electromagnetic radiation with particulate theories of matter,Einstein adopted what is generally known as a heuristic approach.He proposed to investigate the consequences of assuming that light‘consists of a finite number of energy quanta localized at points of space that move without dividing,and can be absorbed or generated only as complete units’.This is Einstein’s light-quantum hypothesis.In fact,Einstein’s 1905 paper is titled: ‘On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light’,Annalen der Physik,17 (1905),132–48.This paper is translated and reproduced in John Stachel (ed.),Einstein’s Miraculous Year: Five Papers that Changed the Face of Physics,Centenary edition,Princeton University Press,Princeton,NJ,2005.The quote appears on p.178.

23. Smolin,Time Reborn,p.121.The italics are mine.

24. Anna Ijjas,Paul J.Steinhardt,and Abraham Loeb,‘Pop Goes the Universe’,Scientific America,January 2017,32–9.

25. Paul J.Steinhardt and Neil Turok,Endless Universe: Beyond the Big Bang,Weidenfeld & Nicolson,London,2007,pp.240,242.

26. 在《奇异宇宙与时间现实》一书中，斯莫林指出，每次碰撞的轨迹都需要由一个动力学吸引子来主宰。

27. Smolin,Time Reborn,p.126.

28. James M.Lattimer,‘The Nuclear Equation of State and Neutron Star Masses’,Annual Review of Nuclear and Particle Science,62 (2012),485–515.See also arXiv:nucl-th/1305.3510v1,15 May 2013.

29. James Lattimer,personal communication,14 July 2017.

30. Smolin,‘Time Reborn’.Available at http://www.perimeterinstitute.ca/videos/time-reborn

31. Smolin,Time Reborn,p.151.

32. Lee Smolin,‘A Real Ensemble Interpretation of Quantum Mechanics’,Foundations of Physics,42 (2012),1239–61; arXiv:quant-ph/1104.2822v1,14 April 2011.

33. “系综”和“合奏组”在英语中都用“ensemble ”这个词来表示。——译者注

34. Smolin,Time Reborn,p.191.

35. Lee Smolin in Roberto Mangeibera Unger and Lee Smolin,The Singular Universe and the Reality of Time,Cambridge University Press,Cambridge,UK,2015,p.499.

后记 就像两个被捆在一起的登山者

我在前言中宣称，在我们理解时间与空间的本质、理解物理实在的内部构造方面，量子引力理论是我们这个时代最大的科学难题。因为它建立在两个广受尊敬的理论——广义相对论和量子力学之上，这两个理论都足以让我们绞尽脑汁了，所以把两个理论结合起来产生新的时空理论所需要的概念要把我们的认知推向极限乃至以外，也不足为奇。我希望，在这本书中，透过李·斯莫林与卡洛·罗韦利这两位已经为圈量子引力的创始、发展和演化奉献了30年的理论物理学家的科学故事，我至少已经让你对圈量子引力理论和圈量子宇宙学有了一些感觉。

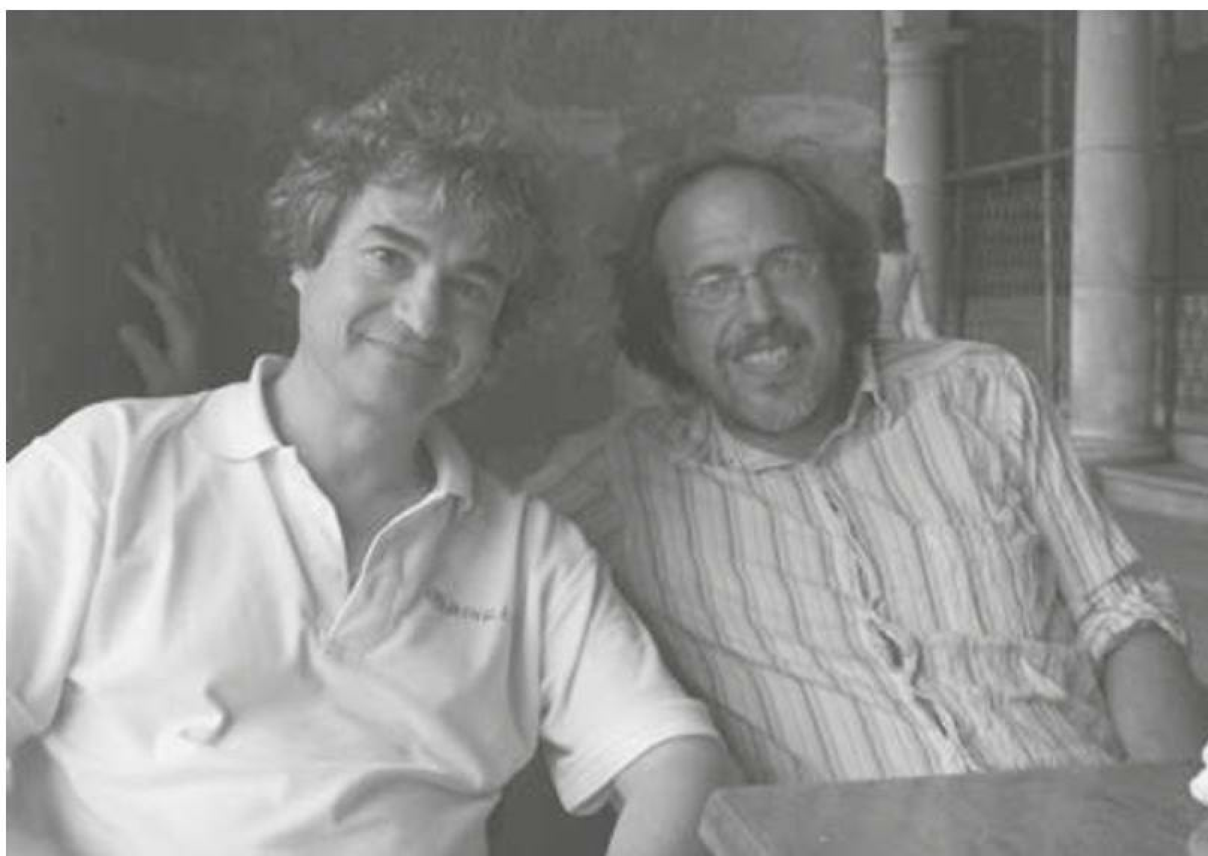


图30 罗韦利（左）与斯莫林

而通过这篇后记，我希望尽可能清晰地整理这本书的思路，不管是从个人的角度还是从科学的角度都是如此。它基于斯莫林、罗韦利和我之间的一系列电子邮件，以及2017年12月15日的三人视频通话内容完成。

追寻量子引力理论永远是一项有风险的事业，需要极大的勇气。从个人角度看，你们觉得这项事业是否给了你们应有的回报？

投入量子引力的研究，需要我们抛弃常人眼中“理智的”科研生涯路径。不管是斯莫林还是罗韦利，他们在还是年轻的学生的时候，都曾被老师劝诫，让他们不要踏入此领域。

对于斯莫林来说，职业生涯在他在哈佛读研究生的第一年就很清晰了。年轻、有抱负的科学家被按照他们为人所知的能力，以及他们所从事领域的价值（或者说符合大众趋势的程度）排序，胜利者就能获得知名大学的教职。斯莫林对参与这场竞争毫无兴趣，他认为一旦这么做，就意味着放弃了自己研究科学的理由。“有一次，我遇到了科学哲学家保罗·费耶阿本德（Paul Feyerabend），”斯莫林解释道，“他建议我永远只做自己想做的事情。他告诉我，如果一个人有一个清晰而强烈的目标，别人劝阻你的动力就不会有你追寻目标的动力强。”

斯莫林很清楚，这种带有反叛性质的独立研究需要很大的勇气，而且可能会让他无法再回到常春藤学校。但回顾自己的事业，他的运气很好，也就是说他的勇气没怎么受到真正的检验。他获得了很多机会，让他得以保持自己的独立性，这些机会远远超过了因所在的研究领域而错过机会带来的代价。而且，在过去的17年中，他在圆周理论物理研究所的职位，用他自己的话来说，是“宇宙中最好的工作”。

“从个人角度而言，这是一场非凡的旅程，我从中收获的满足感已经大大超出了我的预期。”斯莫林说。这些满足感中，很大一部分来自与他人（包括罗韦利和其他人）建立的友谊，也有很大一部分来自看到

他们的想法和结果被一大群极有才华的年轻人所采用，他看到了这些年轻人的生活和事业的蓬勃发展。

罗韦利的感受基本相同。在他理论物理学家职业生涯的早些时候，他会劝告想要走与他相同道路的年轻学生，指出这条路上的种种艰难，但仍然会鼓励他们走自己想走的道路。“如今，我变得更为谨慎了，”他说，“但我还是会这样做。我们每个人只有一次生命，因此谨慎是没有意义的。我会建议学生在开展一项计算之前先做很多研究，因为我感觉这个方法对我来说很有用。同样，我也建议学生不要听从他人的建议，因为我也是这么做的。”

这真是一场非凡的旅程。“这是一场极为奇妙的旅程，一次真正的冒险，”罗韦利说，“从我第一次认识李开始至今，我经历了很多充满激情的瞬间，也经历了很多令人抑郁的瞬间。但这些经历让我极为幸福。”斯莫林回想起了乔治·布拉克（Georges Braque）形容自己与毕加索一同引领立体主义潮流时说的一段话：“那些年毕加索和我之间说的话，永远也不会有人再说一次了，哪怕有人说了，也不会有人明白。当时的我们就像两个被捆在一起的登山者。”

“如果站到我第一次遇见卡洛时的角度来看待他这个人，以及他的科学生涯，”斯莫林说，“我无法不为他取得的成就，以及他启迪我们思考的内容而惊叹。我尝试着做同样的事情，但我无法确信自己能成功。与卡洛的友谊与合作改变了我的一生。它让我的生活变得更加复杂，但也更加丰富，不管是在科学的层面还是个人的层面都是如此。”

罗韦利接受了斯莫林对他的褒扬。“显然，光靠我们两人的单打独斗，我们不可能取得如今通过合作取得的成就。不过，我的物理学事业在很大程度上依赖于李。我们合作的方式远远超过了友谊，它对我来说不仅是力量之源，也是善意之源，帮助我面对这个世界。虽然我们时而观点不合，但他一直都是一位可靠的伙伴，他永远站在我这一边。对我来说，这就是我们的故事中最佳的一部分。”

那在科学上的回报呢？

罗韦利的梦想是探索量子引力的主题，并获得一些关于普朗克尺度的物理学的线索，他相信自己的梦想已经实现了。“我觉得我们已经取得了一些真正的进步，”罗韦利说，“可能是一个很大的进步，也可能只是一个很小的进步，我不知道。我对现状已经很满意了，但我还想了解更多的事情。我希望能活得够长，能看到我们理论中的一些暗示被实验证实，毕竟到了那样一个阶段，事情总会水落石出的。不管结果如何，我都觉得这些工作没有白费。”

斯莫林同意他的说法。“我对（圈）量子引力的结构也很满意，”他说，“圈量子引力最非凡的一点是，如果你从哲学角度去思考——这正是卡洛和我倾向于做的事情，思考先于几何诞生的网络（几何从中演生出来）就是一种实现相对性、背景无关性和局域性的自然的妥协方案。”

“哪怕我仅仅是把它写下来，对这样一个结构的研究本身也很有说服力了。它是完全通过广义相对论的量子化而导出的，这一点就让它很可信。因此，对于具体的细节，比如这个算符或那个算符用对了没有，其实我并不是很关心。对我来说最重要的是，圈量子引力理论的整个结构是极为合理的：它以一种客观的方式被推导出来，这正是你在思考这样一种理论的时候预期会出现的东西。我同意卡洛所说的——我们还不知道结果会如何，它有可能很接近真实，也有可能离真实十万八千里。”

在《通向量子引力的三条途径》中，斯莫林的预测广为人知：我们到2010年，最晚2015年就能得出量子引力理论的基本框架。而罗韦利承认，如今圈量子引力理论在两个基本的方面仍然是不完整的：我们缺乏直接的实证支持，而且该理论本身有无数悬而未决的问题。“第一个方面是至关重要的，”罗韦利说，“第二个方面在我看来被夸大了。基本上可以说，现有的所有理论都存在无数悬而未决的问题。圈量子引力理论

至少在某些方面是一种可能成立的量子时空理论。我们不知道它正确与否，但我们至少已经有拥有一个量子引力理论了。从这个意义上说，我相信李的预测没错。”

斯莫林感谢了罗韦利的宽容，但他自己不这么认为。他说：“我必须承认，我写出那个预言的时候，心里想的是到那个时候会有一些实验证据来证实量子几何的离散性，比如伽马射线暴或者其他天体物理学观测。圈量子引力的主要预言，比如面积与体积谱，确实是有可能成立的，如果它们真的成立，那自然很令人满意。但我们不知道它们是不是真的成立，这同样令人沮丧。”

对于下一代理论物理学家，斯莫林说：“我让他们把我们这一代物理学家看作一群失败者：我们在20世纪七八十年代接过了物理学研究的接力棒，却没能确定无疑地把它推进一步。不管我们的这些不完备的构造对他们来说有用与否，我都希望他们能逃离现有的结构，超越我们，去完成爱因斯坦开启的这场革命。”

圈量子引力理论最引人注目的方面就是它预言空间本身是量子化的，没有其他哪个量子引力理论得出了这样的预言。你认为这是你们最令人满意的成就吗？

1995年5月，斯莫林与罗韦利在《核物理学B》期刊上发表了一篇题为“量子引力中面积与体积的离散性”的论文（我们在第10章开头讨论过），这是圈量子引力圈子里被引用次数最多的论文之一，这一结果也清晰地展现了普朗克尺度的空间结构。“得到这个结果的过程混杂着迷惑、绝望和喜悦，”罗韦利说，“这个想法其实是李提出来的，不是我，李也做了初始的计算。当时我们在维罗纳，两人都因为谈恋爱分了心，但我们在我公寓里匆忙演算方程的那些时候，以及发现我们提出的设想真的起作用了的时候感受到的震惊和纯粹的喜悦，至今仍历历在目。我觉得这是我们的成就中最坚不可摧的一部分，如果说有哪一件事会一直伴随着我，那就是它了。”

斯莫林表示同意，但他强调这篇论文只是发现并建立圈量子引力理论的一系列论文的高潮，此前还有他与特德·雅各布森合作的量子几何学论文，以及他与罗韦利合作的两篇标志着圈量子引力理论创立的论文。斯莫林对自己1995年发表的“连接性”论文（见第11章）也很引以为豪，他认为这是自己独立为圈量子引力理论做出的最大贡献：“尽管不是所有人都认可它，这篇论文也为圈量子引力关于视界和熵的所有工作奠定了基础。”

看起来，圈量子引力与圈量子宇宙学获得实证支持的唯一希望在于未来的天文学和宇宙学观测。但目前为止，关于所有的量子引力理论，学界有没有某种共识，认为其中某一种途径优于其他途径？

从某种程度来看，天体物理学观测已经暗示某些在普朗克尺度会违反狭义相对论的量子引力理论，以及在LHC探测的物理学尺度需要依赖超对称的理论可能是不正确的。“虽然过往的海量文献中支持两边的都有，”罗韦利说，“但我会说，量子引力如今确定无疑已经到了直面现实的地步。”

在大众眼中，科学似乎是一个完全关乎“真相”的领域，对于一个问题，总有一个回答，要么是对的，要么是错的。科学确实在不断进步，但这样的进步揭示的是，我们对于“什么是真的”的理解是会依情况而变的。“一项科学发现是很可信的，”罗韦利说，“但在同时，科学知识永远不是确定性的，永远都会面临修正。这是核心要点。科学正是通过不断证伪我们曾经认为确定无疑的事实，才积累起它如今的可信度和可靠性的。”在科学中，我们认为一件事是对的，只是因为我们还没有发现能推翻它的证据而已，而一旦它被推翻，我们就代之以新的真相——暂时的真相。

在对新科学的展望方面，斯莫林则认为，如今量子力学表面上的坚不可摧，其实被大大高估了。“随着我们在量子领域探索得越来越深入，如果有一些异常现象浮出水面，提示我们修正量子力学或让它变得

更完备，我也不会感到多么惊讶。”

但在科学上，很少有哪个实验或者观测是决定性的。研究一下科学史，你就会发现这样一种倾向：哪怕自己相信的理论面临着铁证如山的反对证据，物理学家通常也还是倾向于坚持他们珍爱的理论。不过，通常发生的事情是：越来越多支持或反对某个理论的间接证据逐渐积累，最终让人们接受或者摒弃了它。取得任何共识看起来都是不太可能的，即使是短期共识也不太可能。

不过，斯莫林的心态很放松。“在没有实验证据的确认，或者确定性的证明的情况下，我觉得我们无须达成共识，”他表示，“这样的共识是不成熟的。我理想中的世界，是支持原创性和独立研究的，并鼓励从不同方向去尝试解决未解问题的世界。”

从最近的经验来看，基础理论物理学的主要理论架构至少要经过一代甚至两代物理学家的努力才能得出一些结论。在这样一个可能永远都得不到答案的时代研究物理学，你们有什么样的感受？

斯莫林回想起他研究生时期在法国参加的一次暑期学校，当时理查德·费曼做了几场演讲，斯莫林跟费曼有过几次对话。在其中一次对话中，费曼表达了对于自己不能活得足够久以看到他最感兴趣的问题的答案的愤怒之情。“我一直否认这一点，”斯莫林说，“但它确实很令人烦恼。我认为实验科学家应该赶紧好好工作，用他们的想象力来设计出更好的实验。”

“检验理论的并不是实验科学家，虽然实验科学家的工作属于其中的一部分。激发实验科学家灵感的通常是理论之间的分歧和不一致，这会促使他们设计实验来检验以前没有显示出的现象。我希望在量子引力领域也是如此。我认为必须有人从挫折中走出一条路来，这也许是在我们意识到某种如今可以测量的东西能够检验已有的理论的方面。”他说。

罗韦利的看法与斯莫林有所不同。“你看，哥白尼去世的时候，没有什么证据表明地球围绕着太阳运动。玻尔兹曼去世的时候，也没有什么证据认为原子和分子是热与熵的来源。很多伟大的小说家去世时，他们的小说甚至都没有发表。这都没有关系。就算没有实验验证，我们理论物理学家仍然有很多工作可以做。”

“当然，我也很好奇，我也有求知欲，但我并不悲观。你可能经常会觉得理论物理学领域没有什么事情在发生，但回头看看你就会意识到，确实有一些事情在发生。如今我们对于超对称的态度，跟短短5年前相比就已经发生了变化。我们现在已经证实了引力波的存在，不久以后还会有事件视界望远镜。[注][注]如果我们能从中得到现今都没想到过的实证信息，我一点儿也不会感到惊讶。”他说。

理论物理学圈仍然呈现出两极分化的态势，你们认为未来有将弦论和圈论调和起来的可能性吗？

令人惊讶的是，尽管斯莫林在2006年的“弦论战争”中扮演了显而易见的角色，他却认为，自己的职业生涯中唯一需要真正的勇气的时候是在20世纪90年代末，当时他选择研究如何把弦论和圈量子引力理论统一起来。这在某种程度上导致他被孤立，并且受到了来自他曾经属于的那个群体的批评：

> 这些人是我非常尊敬且喜爱的，但我无法让他们相信我的观点：从一开始，弦论与圈量子引力理论就像一对连体婴儿，它们表达了同样的物理学思想，即量子场与延展物体之间的对偶性。

我希望通过这本书让读者意识到，圈量子引力理论和弦论在某些方面有紧密的关联。况且，虽然目前看来斯莫林将它们统一起来的努力失败了，但在某种程度上，调和两者的可能性正在增加。斯莫林仍然抱有希望，但他相信弦论研究者的关注点已经移开了。如今，很少有弦论学家仍在关注弦本身，他们更感兴趣的是AdS/CFT对偶，最近又在关注与

量子纠缠演生出时空有关的一系列有趣的想法。“对我来说，最令人激动的是，圈量子引力理论提供了一系列完美的工具，可以描述全息物理学和量子纠缠，”斯莫林说，“实际上，罗杰·彭罗斯提出自旋网络的最初动力，就是要用量子纠缠在相关性的背景下表达马赫原理——这清清楚楚地写在他关于自旋网络的原始手写笔记上。彭罗斯一开始的自旋几何定理，就预示着空间自纠缠中诞生的想法。用圈量子引力的语言表达这些想法，有很大的空间。”

对此，已有一些有希望的迹象。在最近（2017年）在华沙举行的圈量子引力会议上，普林斯顿大学的优秀弦论物理学家赫尔曼·韦尔兰德［Herman Verlinde，他还有一个双胞胎兄弟叫埃里克（Erik），也是理论物理学家］谈论了弦和圈之间可能存在的联系，对这一课题的研究如今仍十分活跃。

“我原本对这一问题存有很多疑虑，”罗韦利说，“但现在我正在改变观点。”

---

1. 事件视界望远镜（EHT）的目标是利用8台射电望远镜组成的全球网络，用一种称为甚长基线干涉测量（Very Long Baseline Interferometry）的方法，创造一个有地球那么大的虚拟望远镜。EHT被用来研究银河系中心的超大质量黑洞（射手座A*）和椭圆星系M87中心的黑洞，观测的角分辨率与黑洞的事件视界相当。2017年12月13日，携带着数据的硬盘已经从南极望远镜被运到麻省理工学院的海斯塔克天文台，数据分析于2018年初开始。

2. 2019年4月10日，事件视界望远镜合作组宣布在M87星系的中心成功捕获人类首张黑洞图像。——译者注

词汇表

ADM 形式（ADM formalism）　对广义相对论约束哈密顿量表述方法进行大幅简化并细化的数学形式，以其提出者理查德·阿尔诺威特、斯坦利·德塞尔和查尔斯·米斯纳的姓首字母命名，首次发表于1959年。这一形式对量子引力的正则方法起了关键作用，也是通往惠勒–德威特方程的关键一步。

CERN　法语“Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire”（欧洲核能研究理事会）的缩写，该理事会成立于1954年。后来临时理事会被撤销，该组织改名为“欧洲核子研究组织”，仍缩写为CERN。CERN位于日内瓦北部郊区，靠近瑞士与法国的边界。

***g*因子（g-factor）**　基本粒子或复合粒子的（量子）角动量与其磁矩（沿着它在磁场中所采取的方向）的比值常数。实际上，电子有三个g因子，一个与自旋有关，一个与轨道角动量有关，一个与自旋及轨道角动量之和有关。狄拉克的相对论量子理论预测电子自旋的g因子为2。2010年，国际科技数据委员会（CODATA）任务组的推荐值是2.00231930436153，它与整数2的差异来自量子电动力学效应。

K介子（kaon）　一组自旋为0的介子，由上夸克、下夸克、奇夸克及它们的反夸克组成。K介子包括K^+介子（上夸克–反奇夸克）、K^-介子（奇夸克–反上夸克）、K^0介子（下夸克–反奇夸克和奇夸克–反下夸克的混合态）。K^+介子与K^-介子的质量为493.7 MeV/c^2，K^0介子的质量为497.6 MeV/c^2。

LHC　大型强子对撞机（Large Hadron Collider）的缩写。这是全

世界能量最高的粒子对撞机，设计目标是能产生14 TeV的质子–质子对撞能量。LHC坐落在日内瓦附近，靠近瑞士与法国的边界，其周长达27千米，位于175米深的地下。2012年7月，LHC在7 TeV和8 TeV的质子–质子对撞能量下运行，提供了标志着希格斯玻色子被发现的证据。在关停了两年后，它于2015年重新启动，在13 TeV的对撞能量下运行。

MSSM 最小超对称标准模型（minimum supersymmetricstandard model）的缩写。MSSM是粒子物理学常规标准模型的基础上加上超对称假设的最小扩展版本，由霍华德·乔治和萨瓦斯·季莫普洛斯（SavasDimopoulos）在1981年提出。

M理论（**M-theory**） 见“弦论/M理论”。

W、**Z**粒子（**W, Z particles**） 传递弱核力的基本粒子。W粒子是自旋为–1的玻色子，有带一个正电荷和带一个负电荷的两种（W^+，W^-），质量为80.4 GeV/c^2。Z粒子，即Z^0，为电中性、自旋为–1的玻色子，质量为91.2 GeV/c^2。W粒子和Z粒子通过希格斯机制获得质量。

β放射性/衰变（**beta radioactivity/decay**） 由法国物理学家亨利·贝克勒尔（Henri Becquerel）于1896年首次发现，并由欧内斯特·卢瑟福在1899年命名。β衰变是弱力衰变的一个例子，在其过程中，中子里的一个下夸克变成上夸克，从而将中子变为质子并放出一个W^-粒子，W^-粒子再衰变成一个高速运动的电子（即β粒子）和一个电子反中微子。

β粒子（**beta particle**） 从发生β放射性衰变的原子核中放射出的高速电子。见“β放射性/衰变”。

∧**-CDM** “∧–冷暗物质”的简称，亦称“协调模型”或大爆炸宇宙学的“标准模型”。∧–CDM模型解释了宇宙的大尺度结构，宇宙微波背景辐射，宇宙的加速膨胀，以及氢、氦、锂、氧等元素的分布。根据最新的普朗克卫星数据，该模型推算出的宇宙年龄为138亿年，宇宙质能的

69.1%为暗能量的形式（反映在宇宙学常数Λ的大小上），26.0%是冷暗物质，剩下的可观测宇宙（星系、恒星、行星、气体和尘埃）只占4.9%。

μ子（**muon**）　与电子相对应的第二代轻子，电荷为–1，自旋为1/2（费米子），质量为105.7 MeV/c^2，由卡尔·安德森（Carl Anderson）和塞思·内德迈耶（SethNeddermeyer）于1936年首次发现。

π介子（**pion**）　一类自旋为0的介子，由上夸克或下夸克及其反粒子组成。π介子有三种：π^+（由上夸克和反下夸克组成）、π^-（由下夸克和反上夸克组成）和π^0（上夸克和反上夸克、下夸克和反下夸克两种态混合而成），质量分别为139.6 MeV/c^2（π^+和π^-）和135.0 MeV/c^2（π^0）。

阿（托）（**atto**）　一个前缀，表示10^{-18}。1阿米（am）表示10^{-18}米，即1飞米的千分之一。质子的半径大约是850阿米。LIGO能分辨出的位移的数量级就是1阿米。

阿什特卡变量（**Ashtekar variables**）　阿什特卡在1986年引入的“新变量”，它使得广义相对论的约束哈密顿量形式可以用自旋联络的形式表述出来。这是发展圈量子引力理论道路上的关键一步。

暗能量（**dark energy**）　见“宇宙学常数”。

暗物质（**dark matter**）　由瑞士天文学家弗里茨·茨维基（Fritz Zwicky）在1934年发现。他发现后发星系团（位于后发座）中星系的质量测量值存在异常，不能解释星系团边缘的星系的旋转速度为何那么快，这意味着该星系团的质量比预测值大很多。可以说，整个星系团的多达90%的质量是“缺失的”，或者说不可见的。这种缺失的物质被称为“暗物质”。后续研究青睐一种被称为“冷暗物质”的暗物质形式。

见“冷暗物质”。

暴胀（**inflation**） 见“宇宙暴胀”。

暴胀子/暴胀子场（**inflaton/inflaton field**） 科学家认为，在大爆炸之后的极早期，宇宙经历了一场急速的暴胀，它“抚平”了宇宙的“褶皱”，因此解决了平直性问题和视界问题（以及另一个与磁单极子相关的问题）。暴胀模型的一个版本基于暴胀子场的概念。暴胀子场是一个标量场，其行为很像希格斯场（有人提出暴胀子场和希格斯场就是同一个场）。暴胀子场的粒子被称为暴胀子。它的作用机制可以大致描述如下：暴胀子场的真空态是一种所谓的“假真空”——它有一个非零的能量，表现得像宇宙学常数一样，这种能量带来了时空的急剧膨胀。在很短暂的暴胀之后，这个假真空衰减成“真”真空，时空继续膨胀，但速度要平缓得多，只有一个小的剩余能量（即暗能量）让宇宙继续加速膨胀。见“宇宙暴胀”和“慢滚暴胀”。

贝尔定理/不等式（**Bell’s theorem/inequality**） 由约翰·贝尔在1966年提出。为了解决波函数的坍缩与“幽灵般的超距作用”问题，最简单的对量子理论进行延伸的方法就是引入一种局域隐变量，主宰量子粒子的性质和行为。贝尔定理表明，任何局域隐变量理论提出的预言，都不会与量子理论完全一致，贝尔不等式将其总结为：局域隐变量的预言不可能超过某一个最大值。然而，量子理论预言在某些实验条件下，结果会超过这个最大值。因此，贝尔不等式提供了通过实验来直接检验隐变量理论和量子理论中哪一个正确的方法。

标度因子（**scale factor**） 见“宇宙标度因子”。

波函数（**wavefunction**） 一种将电子这样的物质粒子表示成“物质波”的数学描述，它带来了以波动为特征的方程。这类波动方程中的主角是一种波函数，其振幅和相位在时空中演化。氢原子中电子的波函数形成了一种围绕原子核的特征性三维形状，称为“轨道”。波动力学是

一种以物质波的形式描述量子力学的表达方式，由埃尔温·薛定谔在1926年提出。

波函数坍缩（**collapse of the wavefunction**）　在大多数量子系统中，量子实体的波函数是非局域性的，弥散在一个空间区域之内（即这个量子物体可能在这里，也可能在那里，在波函数的边界之内都有可能出现）。但一旦有人做出测量，结果就变成了局域性的，只集中在一个特定位置上（物体出现在这里）。类似地，一项量子测量可能产生大量不同的结果（如自旋向上或自旋向下），因此需要通过波函数的叠加态来描述这些结果。得到一个特定结果的概率与叠加态中对应波函数的振幅的平方成正比。不管测量得到哪一个态，我们都说波函数（或者说叠加态）“坍缩”了。一系列可能的结果变成了一个确定的结果，而其他的可能性全都消失。

波粒二象性（**wave-particle duality**）　所有量子粒子都具有的一项基本特征，即同时表现出像波一样的离域性（如衍射和干涉）和像粒子一样的定域性，具体依赖于对它们进行什么样的测量。路易·德布罗意在1923年首次提出电子等物质粒子具有这种性质。

玻尔半径（**Bohr radius**）　氢原子中电子绕质子运动的轨道距离。在玻尔发表于1913年的原子模型中，玻尔将一系列物理学基本常数（包括普朗克常数、光速、电子质量和电荷）组合在一起得到了这个距离。在薛定谔的波动力学中，最低能级的电子在原子核周围呈球对称分布，但找到它的概率最高的地方是在玻尔半径处，这个数值略高于0.0529纳米。

玻色子（**boson**）　得名自印度物理学家萨蒂延德拉·纳特·玻色。玻色子的特征是自旋量子数为整数（1，2，3…），因此不服从泡利不相容原理。玻色子与物质粒子之间力的传递有关，包括光子（电磁力）、W粒子和Z粒子（弱力）及胶子（色力）。自旋为0的粒子也被称为玻色子，但它们并不传递力，如π介子和希格斯玻色子。引力子是假

想中的引力场的粒子，被认为是自旋为2的玻色子。

不确定性原理（**uncertainty principle**） 由维尔纳·海森堡在1927年发现。不确定性原理称，我们对“共轭”可观测变量对（如粒子的位置和动量，或者能量和能量的变化率）的观测结果存在一种本质上的限制。这一原理可以追溯到量子物体本质上的波粒二象性。

不相容原理（**exclusion principle**） 见“泡利不相容原理”。

参考系（**frame of reference**） 由一个坐标系定义，物理位置的确定和测量均要参考这个坐标系。参考系可以是一套静止的坐标系，用它来测量运动；它本身也可以是运动的（如旋转参考系）。狭义相对论尤其关注惯性参考系，在惯性参考系中，受到的合力为零的物体要么保持静止，要么做匀速直线运动（牛顿第一运动定律）。

参考系拖曳（**frame-dragging**） 广义相对论预测，一个有质量的物体（如地球）在静态或稳恒态引力场中移动或旋转的时候，会拖曳它周围的时空。这一效应由奥地利物理学家约瑟夫·伦泽和汉斯·蒂林首先导出，因此有时也被称为伦泽–蒂林效应。它可以看作引力版的电磁感应现象。参考系拖曳效应已被引力探测器B观测到，但探测器上的陀螺仪出了问题，因此虽然陀螺仪进动的程度与广义相对论的预言完全一致，但测量值的不确定度很大。

粲夸克（**charm quark**） 第二代夸克之一，带有+2/3电荷，1/2自旋（它是费米子），其裸质量为1.28 GeV/c^2。1974年，美国布鲁克海文国家实验室和斯坦福直线加速器中心在对J/ψ粒子进行观测的同时发现了它（称为“11月革命”），J/ψ粒子是一个介子，由一个粲夸克和一个反粲夸克组成。

超暴胀（**superinflation**） 在圈量子宇宙学中，宇宙无法被压缩到小于一个单位体积量子的体积，因此避免了宇宙进入奇点，取而代之的

是一场宇宙“大反弹”。在宇宙从反弹中恢复时，它不可避免地要经历一场非常急速的膨胀，膨胀一直持续到宇宙质能密度从反弹临界密度ρc下降到它的一半。这个过程就是“超暴胀”，但它持续的时间不够长，无法解释我们今天见到的宇宙大尺度结构。因此，物理学家仍需引入更常规的慢滚暴胀过程。见“宇宙暴胀”、“暴胀子场”和“慢滚暴胀”。

超对称（**supersymmetry**，**SUSY**）　一系列假设了费米子与玻色子之间存在本质上的时空对称性的理论结构。将超对称应用于粒子物理标准模型，物质粒子（费米子）与力粒子（玻色子）之间的不对称就可以用超对称的破缺来解释。在很高的能量（如大爆炸早期宇宙所具有的能量）尺度上，超对称不会破缺，费米子与玻色子之间有完美的对称性。除了费米子与玻色子之间的不对称之外，超对称的破缺还预言了粒子存在自旋与其相差1/2的超对称伙伴。将超对称应用在标准模型上的最简单的理论叫作最小超对称标准模型（MSSM），费米子的伙伴被称为超费米子（sfermion）：电子的超对称伙伴被称为超电子（selectron），每个夸克都有一个超夸克（squark）伙伴。同样地，如今标准模型中的每一个玻色子，也都有一个对应的超对称伙伴，被称为玻色微子（bosino）。光子、W粒子、Z粒子和胶子的超对称伙伴分别被称为光微子（photino）、W微子（wino）、Z微子（zino）和胶微子（gluino）。超对称解决了如今的标准模型中的一些问题，但与粒子和反粒子之间的对称性不同的是，它必须进一步假设所有的超对称伙伴都有很大的质量，而到目前为止，还没有哪种令人满意的对称性破缺机制能解释这一点。如今，大型强子对撞机收集到的数据已经有效排除了MSSM，而我们也没有找到任何类型的证据暗示超对称伙伴的存在。见“MSSM”和“超引力”。

超引力（**supergravity**）　将超对称原理——假设费米子和玻色子之间存在一种本质的时空对称性——应用在广义相对论上，就产生了一系列超引力理论。最简单的例子是只引入了一种对称性的超引力理论，由丹尼尔·弗里德曼、彼得·范尼乌文赫伊曾和意大利物理学家塞尔焦·费

拉拉在1976年首先提出，斯坦利·德塞尔与布鲁诺·祖米诺也独立提出了这一理论。假设超对称的存在，解决了重正化（与引力子的辐射修正相关的无穷大贡献可以通过它的超对称伙伴来部分地消除）带来的一些麻烦，但并不能够完全消除问题。20世纪80年代初，有人基于8种不同的弦论提出了一个延伸版本的超引力理论，引起了一阵兴奋。直到如今，超引力的重正化也没有解决，问题仍然存在，因此物理学家对该理论的兴趣已经减弱。见“超对称”。

重正化（**renormalization**）　引入粒子作为场的量子的概念，带来的一个后果是粒子发生自相互作用，即与自身的场发生作用。这意味着一些用来解场方程的数学技巧（如微扰论）就不可用了，因为自相互作用会产生无穷大的修正。物理学家引入了重正化作为一种数学手段，通过重新定义场粒子的参数（如质量和电荷），消除了这些自相互作用的项。见“自能”。

大爆炸（**Big Bang**）　用于描述138亿年前宇宙诞生初期的一场时空与物质的“爆炸”。这个名字首先由大爆炸的反对者、物理学家弗雷德·霍伊尔提出，用以嘲笑大爆炸理论。但从那时到现在，通过探测并绘制宇宙微波背景辐射（大爆炸发生38万年后，辐射与物质刚分离时，热辐射存留到现在的冷遗迹），压倒性的证据表明，宇宙的确起源于这样一场大爆炸。

大爆炸理论标准模型（**standard model of Big Bang cosmology**）　见“∧–CDM模型”。

大反弹（**big bounce**）　如今的暴胀大爆炸模型（有时被称为∧–CDM模型）基于经典广义相对论，它预言宇宙在一个“时间零点”起源于一个密度无穷大、温度无穷高的大爆炸“奇点”。然而，在圈量子引力理论中，不可能存在比基本体积量子更小的空间体积。计算机模拟表明，宇宙会收缩到这一最小体积，在达到一个比普朗克密度小得多的临界密度之后，宇宙会“反弹”并开始膨胀。

大统一理论（**grand unified theory，GUT**）　任何尝试把电磁力、弱力和强力统一到同一个结构中的理论都可称为大统一理论。首个大统一理论的粒子由谢尔登·格拉肖和霍华德·乔治于1974年提出。大统一理论并不尝试纳入引力，尝试纳入引力的理论被称为“万物理论”（theory of everything，TOE）。

德布罗意关系（**de Broglie relation**）　这一等式由路易·德布罗意在1923年导出，将量子波–粒子的波动性（波长λ）和粒子性（线动量p）联系起来，即$\lambda=h/p$，这里的h是普朗克常数。对我们日常生活中的宏观物体（如网球）来说，德布罗意关系预测的波长实在太小，无法观测到。但像电子这样的微观物体的波长就处于可测范围内了，大约为可见光波长的十万分之一。一束电子可以发生衍射，也可以产生双缝效应。科学家常用电子显微镜来研究无机与生物样本的结构。

等效原理（**equivalence principle**）　在爱因斯坦所称的“一生中最幸福的思想”中，他意识到，如果我们做自由落体运动，就既不会感受到加速度，也不会感受到引力：我们对加速度的感觉与对引力的感觉是等价的。这意味着，一个物体的惯性质量（物体抵抗加速度的量度，即$F=ma$中的m）与其引力质量（负责施加引力的质量，即$F=Gm_1m_2/r^2$中的m_1和m_2）一致。

底夸克（**bottom quark**）　有时也被称为“美”（beauty）夸克。它是第三代夸克之一，带有–1/3电荷、1/2自旋（费米子），其裸质量为4.18 GeV/c^2。它于1977年在费米实验室对υ粒子的观察中被发现，υ粒子是一个介子，由底夸克和反底夸克组成。

电磁力（**electromagnetic force**）　几位实验与理论物理学家的工作表明，电和磁是同一种基本相互作用力。这些物理学家中最广为人知的是英格兰物理学家迈克尔·法拉第和苏格兰理论物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦。电磁力是把原子中的电子束缚在原子核周围，以及将原

子结合起来以形成各种各样的分子构成的物质的相互作用力。

电荷（**electric charge**） 夸克和轻子（我们更熟悉的粒子是质子和电子）拥有的一种属性。电荷有两种——正电荷和负电荷，电荷的流动是电力和能源产业的基础。

电弱力（**electroweak force**） 虽然电磁力和弱核力的量级差异巨大，但它们曾经是一种统一的电弱力，物理学家认为电弱力存在于大爆炸之后10^{-36}到10^{-12}秒之间的电弱时期。1967—1968年，史蒂文·温伯格和阿卜杜勒·萨拉姆各自独立地将电磁力和弱核力结合到一种统一场论中。

电子（**electron**） 由英国物理学家约瑟夫·约翰·汤姆孙（Joseph JohnThomson）在1897年发现。电子属于第一代轻子，其电荷为–1，自旋为1/2（它是费米子），质量为0.51 MeV/c^2。

叠加（**superposition**） 在量子力学中，量子物体可以表现得像波，也可以表现得像粒子。但波可以叠加——它们可以叠加在一起形成“叠加态”，这种叠加解释了衍射和干涉效应。在量子测量中，我们有必要构建一种叠加态，其包含描述了不同结果的波函数的贡献。叠加态中每个波函数的振幅的平方，就与观测到对应的结果的概率有关。当人们进行测量之后，波函数就发生了坍缩，其他所有的可能结果都消失了。

顶夸克（**top quark**） 有时也被称为“真夸克”。第三代夸克之一，其电荷为+2/3，自旋为1/2（费米子），质量为173 GeV/c^2。1995年，它在费米实验室被发现。

对称性破缺（**symmetry-breaking**） 如果物理系统的低能量态的对称性低于高能量态，系统就会自发地发生对称性破缺。在系统失去能量并待在能量最低的态上时，对称性会自发减少，即“破缺”。举例而

言，把一支铅笔笔尖朝下立在桌子上，这个状态是对称的，但只要背景环境对其施加一点点影响（例如吹一口气），它就会倒下，回到一个更稳定、能量更低、对称性更低的状态——躺在桌面上，笔尖指向一个特定的方向。

反粒子（**antiparticle**） 它与普通粒子质量相同，但电荷相反。比方说，电子（e^-）的反粒子就是正电子（e^+），红色夸克的反粒子是反红色夸克。在标准模型中，每个粒子都有一个反粒子。有人设想中微子和反中微子（它们只有一项性质不同，即手性——中微子是左手性的）其实是同一个粒子的两个不同的态，这个粒子被称为马约拉纳粒子，得名自意大利理论物理学家埃托雷·马约拉纳（Ettore Majorana）。实验物理学家正着手研究这是不是真的。

飞（**femto**） 一个前缀，表示10^{-15}。1飞米=10^{-15}米=1000阿米=0.001皮米。质子的半径约为0.85飞米。

费米子（**fermion**） 得名自意大利物理学家恩里科·费米。费米子的标志是自旋为半整数（1/2，3/2，等等），包括夸克、轻子及夸克通过多种方式组合成的粒子（如重子）。

分子（**molecule**） 化学物质的基本组成单元，由两个或两个以上原子组成。一个氧分子（O_2）由两个氧原子组成，一个水分子（H_2O）由两个氢原子和一个氧原子组成。

复数（**complex number**） 一个复数由一个实数乘–1的平方根（即i）形成。因此，复数的平方是一个负数：如$5i$的平方$(5i)^2=-25$。复数在数学中被广泛用于解决只用实数不能解决的问题。

干涉/干涉波（**interference/interference waves**） 和衍射一样，干涉也适合用波动模型来描述。当两个不同的波源发出的波（或者从一个波源发出的波通过两个相邻的小孔或者狭缝后）相互叠加时，其结果不

仅依赖于两道波的振幅（高度），也依赖于其相位（即一个特定的点处于波峰–波谷周期中的哪个位置）。在有些位置，两道波会发生相长干涉，产生一个更强的波；在有些位置它们会发生相消干涉，产生更弱的波甚至让波消失。这类干涉通常会形成明暗相间的条纹。见“衍射”。

哥本哈根诠释（**Copenhagen interpretation**） 由尼尔斯·玻尔、维尔纳·海森堡和沃尔夫冈·泡利提出的一种诠释，用来思考量子力学描述的基本量子波–粒子的本质。随着实验设置的不同，波–粒子要么表现出波动性，要么表现出粒子性。但这两种性质是互补的：在这类实验中，物体是波；在那一类实验中，物体是粒子。要询问物体到底是波还是粒子，则是无意义的。

工具主义（**instrumentalism**） 关于理论表现的经验主义走到极端，即为工具主义。工具主义者认为，理论概念和结构仅仅作为一种工具，让我们能总结过去的经验并预测未来，除此之外并没有什么真正的意义。他们认为理论本质上来讲只是一种手段。见“经验主义”。

惯性参考系（**inertial frame of reference**） 见“参考系”。

光子（**photon**） 一切形式的电磁辐射（包括光）背后的基本粒子。光子是一种无质量、自旋为1的玻色子，它是电磁力的传递者。

广义相对论（**general relativity**） 由爱因斯坦在1915年提出。广义相对论用一种引力的几何学理论，融合了狭义相对论和牛顿万有引力定律。爱因斯坦把牛顿引力理论中暗示的超距作用改成有质量的物体在弯曲时空中的运动。在广义相对论中，物质告诉时空如何弯曲，弯曲的时空告诉物质如何运动。

广义协变性（**general covariance**） 如果不存在绝对的参考系，或者一套绝对的坐标系，那么物理学定律的形式必须不依赖于任何坐标系的变化（也就是说，它们应该是协变的）。

广义协变性原理（**principle of general covariance**） 见“广义协变性”。

哈勃定律（**Hubble’s law**） 指美国天文学家埃德温·哈勃首先观察到的一个现象：遥远的星系相对于我们退行的速度正比于它们与我们的距离，用公式可以总结为$v=Hd$，其中v代表星系的退行速度，d代表它与地球的距离，H为哈勃参数，它的值为67.7千米每秒每百万秒差距（根据2015年普朗克卫星公布的数据分析）。1998年，对于几种特定类型的遥远的超新星的研究表明，宇宙实际上在加速膨胀，因此哈勃参数并不是一个常数。见“宇宙标度因子”和“宇宙学红移”。

哈密顿力学/函数/算符（**Hamiltonian mechanics/function/operator**） 哈密顿力学是经典牛顿力学的另一种表述形式，由爱尔兰物理学家威廉·罗恩·哈密顿于1933年提出。经典哈密顿函数是系统的动能与势能之和。动能依赖于动量，与描述系统所用的空间坐标无关；势能依赖于空间坐标，与动量无关。在量子力学（薛定谔方程形式）中，经典动量被对应的量子力学算符所代替，经典哈密顿函数变成了系统总能量的哈密顿算符。

海森堡不确定性原理（**Heisenberg’s uncertainty principle**） 见“不确定性原理”。

黑洞（**black hole**） 这是由约翰·惠勒推广的名词（但并不像很多人以为的那样是他发明的）。一个黑洞是一块时空区域，其中包含的质能太多，以至于它的逃逸速度（即要逃离其引力控制所需要的速度）比光速还快。这一想法其实早在18世纪就出现了，但1916年卡尔·施瓦西的工作才让它广为人知。施瓦西得出了爱因斯坦引力场方程的解。见“施瓦西解/半径”。

红移（**redshift**） 在彩虹色谱中，从红色到紫色，代表光的能量越来越大。这意味着，红光的频率比其他颜色的光都低，即波长更长。

当辐射的波长因为多普勒效应或时空的宇宙学膨胀而变长时，我们就称辐射发生了红移。这并不是说辐射变得“更红”了，而是表示它的波长增加了。比方说，红光发生红移，就可能变成不可见的红外线。见“宇宙学红移”。

互补（**complementarity**）　互补原理由尼尔斯·玻尔提出，它是量子力学哥本哈根诠释的核心支柱。根据该原理，量子波–粒子只有在互不相容的实验条件下才能分别显示波动性和粒子性，我们无法通过同一套实验条件同时观测到这两种性质。不过，波动性和粒子性并不是互斥的，而是互补的。

吉（**giga**）　前缀，表示10亿（10^9）。1吉电子伏特（GeV）为10亿电子伏特，等于10^9 eV或1000 MeV。

加速度（**acceleration**）　表示速度随着时间改变的速率，通常用字母*a*表示，如$F=ma$，这一公式表示力等于质量乘加速度（牛顿第二定律）。

胶子（**gluon**）　在夸克之间传递强色力的粒子。量子色动力学需要8种无质量的色力胶子，它们自身携带色荷。因此，参与色力的胶子并不仅仅是从一个粒子被传递给另一个粒子。质子和中子质量的99%被认为来自色场产生的胶子和夸克–反夸克对所携带的能量。

角动量（**angular momentum**）　我们更加熟悉的线动量在旋转条件下的对应物理量。在经典力学中，角动量是一个矢量（准确来讲叫作赝矢量），可从物体的转动惯量和旋转速度（即角速度）导出。在量子力学中，有两种类型的角动量，分别与轨道运动（如电子在原子中的运动）和自旋有关。两种角动量可以结合起来，形成一个总角动量。在经典力学和量子力学中，角动量都是一个守恒量。

介子（**meson**）　来自希腊语“*mésos*”，意为“中间”。介子是重子的

一个子分类，它们受到强核力的作用，由夸克和反夸克组成。

近日点（**perihelion**）　如果行星沿着圆形轨道围绕太阳运动，那么显然不管行星位于轨道的哪个位置，它与太阳间的距离都相等。然而，太阳系中的行星围绕太阳运转的轨道呈椭圆形，太阳位于椭圆的一个焦点上。这意味着，行星在轨道上运转的过程中，它与太阳之间的距离确实是会变化的。近日点就是行星轨道上距离太阳最近的一个点，而远日点则是轨道上距离太阳最远的一个点。在近日点上，地球距离太阳约1.471亿千米，远日点离太阳的距离则约为1.521亿千米。

经典力学（**classical mechanics**）　指以牛顿运动定律和万有引力定律为核心构建起来的力学体系，虽然对力学的研究始于牛顿之前。该体系研究力对低速（远低于光速）、宏观物体运动的影响。尽管被称为经典力学，这套体系在其适用范围内仍然完全有效。

经验主义（**empiricism**）　关于人类获得知识的几种哲学观点之一。在激进的经验主义哲学中，知识与经验和证据密不可分——“眼见为实”。如果我们不能直接感受到一个物体的存在，甚至不能得到证明它存在的间接证据，我们就不能相信它真实存在。这样的物体被认为是形而上学的（这正是奥地利物理学家、重要的经验主义哲学家恩斯特·马赫广为人知地拒绝原子的真实性的理由）。如今很少有科学家对于独立实在的存在性还有争论（哪怕没有人在看月亮，月亮也依然存在），也少有科学家争论电子和夸克这类只能间接观察到的物体存在与否。但关于在理论上呈现这类实体所用的概念，可能还有一些科学家会采用一种经验主义或者反实在主义的诠释。哥本哈根诠释就是关于量子理论数学形式的一种反实在主义视角。见“工具主义”。

卡拉比-丘空间（**Calabi-Yau space**）　一种特定类型的空间（也称流形或“紧化”），它所具有的性质适于表现超弦理论中6个隐藏的额外空间维度。卡拉比–丘空间中的洞对应于低能的弦振动，因此洞的数目决定了产生的基本粒子类型。

夸克（**quark**）　强子的基本组成成分。强子要么由三个自旋为–1/2的夸克组成（重子），要么由夸克与反夸克组成（介子）。夸克有三代，每一代的味各不相同。上夸克和下夸克是第一代夸克，它们的电荷分别为+2/3和–1/3，质量分别为1.8~3.0 MeV/c^2和4.5~5.3 MeV/c^2；第二代夸克包括粲夸克和奇夸克，它们的电荷分别为+2/3和–1/3，质量分别为1.28 GeV/c^2和95 GeV/c^2；第三代夸克包括顶夸克和底夸克，们的电荷分别为+2/3和–1/3，质量分别为4.18 GeV/c^2和173 GeV/c^2。夸克还携带色荷，每味夸克可带有红、绿、蓝三种色荷。

莱格特不等式（**Leggett inequality**）　得名自英国物理学家安东尼·莱格特，是对贝尔定理和贝尔不等式的逻辑的一种扩展。引入局域隐变量在逻辑上意味着两个结果：对纠缠粒子对的测量不会受到实验仪器初始设置的影响，且不会受到对一个、另一个或是两个粒子实际测量结果的影响。莱格特定义了一类“加密”非局域隐变量理论，其中仪器的初始设置会影响结果，但实际测量结果不会影响结果。这类理论产生的预言并不总是与量子理论相一致，因此莱格特能够提出一条不等式，可以检验结果到底符合哪一个理论。

冷暗物质（**cold dark matter**）　如今暴胀大爆炸宇宙学∧–CDM模型中的关键组成部分之一，人们认为它占宇宙中质能的26.0%。冷暗物质的组成不得而知，但科学家认为它主要包含“非重子”物质，即不包含质子和中子的物质——很可能并不属于标准模型中已知的粒子。

力（**force**）　任何改变物体运动的作用都属于力。在艾萨克·牛顿的运动三定律中，力是被施加的，也就是说，这种作用需要物体与产生力的东西（比如另一个物体）之间有某种物理接触。但牛顿万有引力是个例外，它似乎可以跨过一段距离（发生引力相互作用的物体之间可以没有明显的接触，如地球和月球）而瞬间发生作用。爱因斯坦提出广义相对论后，这个问题才被解决。

粒子物理标准模型（**standard model of particle physics**） 如今被广泛接受的描述物质粒子及其作用力（不包含引力）的理论模型。标准模型包含了一系列量子场论，描述了三代夸克和轻子、光子、W粒子和Z粒子、色力胶子，以及希格斯玻色子。

量子（**quantum**） 能量或角动量等物理量都有一个基本的、不可再分的单元。在量子理论中，这些物理量被认为不是连续变量，而是由离散的小份（称为“量子”）组成。在量子场论中，这一概念得到了扩展，也包含粒子。因此，我们可以说光子是电磁场的量子粒子。这一概念还可以进一步扩展，包含物质粒子本身，如电子是电子场的量子，等等。这一过程有时被称为二次量子化。在圈量子引力中，空间也由离散的面积和体积量子组成。

量子场（**quantum field**） 在经典场论中，一个“力场”为时空中的每个点都赋予一个值。这个场可以是标量场（每一处的值都只有大小，没有方向），也可以是矢量场（每一处的值都既有大小，又有方向）。如果在一块条形磁铁上方铺放一张白纸，再在纸上撒一小撮铁屑，你就可以直观地看到这种由“力线”组成的场。在量子场论中，力由形成波的场的“褶皱”来传递，因而可以说通过粒子来传递（因为波也可以被视为粒子）。这一想法可以延伸到超出力的传递者（玻色子）的范畴，也包含物质粒子（费米子）。因此，我们可以称电子是电子场的量子，诸如此类。

量子电动力学（**QED**） 描述光子在带电粒子之间传递电磁力的量子场论。

量子概率（**quantum probability**） 量子波–粒子（如电子）的波函数一定是非局域性的，在一定的空间范围内（比如氢原子中作为原子核的质子的周围）延展。在某个特定位置，波函数的振幅的平方与在这个位置“找到”该电子的概率有关。同一条原则也适用于形成叠加态的波函数。比方说，假如我们把自旋向上和自旋向下两个态叠加成一个波函

数，我们观测到自旋向上的概率就是叠加态中自旋向上的成分的振幅的平方。如果我们确实观察到该量子物体自旋向上，自旋向下的成分就“消失”了。见“波函数的坍缩”。

量子几何动力学（**quantum geometrodynamics**） 将广义相对论重新表述为一组经典哈密顿方程的方法有时被称为量子几何动力学。经典场论被量子化以后，就得到了量子几何动力学，就像经典电动力学被量子化以后得到的是量子电动力学。

量子纠缠（**quantum entanglement**） 埃尔温·薛定谔在1935年提出的术语，指在一系列特定的条件下或物理过程中，两个或者更多的量子波–粒子的性质和行为受同一个波函数主导的现象。基于贝尔不等式和莱格特不等式，关于纠缠粒子（尤其是纠缠光子）的实验已经被用来实际检验一系列的量子力学局域与加密非局域隐变量扩展。

量子色动力学（**QCD**） 描述8种带色的胶子在夸克之间传递色力的量子场论。

量子数（**quantum number**） 描述量子系统的物理状态，需要明确它的总能量、线动量和角动量、电荷等属性。这类属性的量子化产生的一个后果，就是这些属性的值总是一个小的单位的倍数。这些属性的值除以单位的大小，所得到的不断出现的整数或半整数，就叫作量子数。电子被放置在磁场中时，它的自旋可能会和磁场方向相同或相反，即有“自旋向上”和“自旋向下”两种状态，这两种状态就分别用量子数+1/2和–1/2来表示。其他的量子数还有表示原子中电子能级的主量子数（n）、电荷、夸克的色荷等。

量子引力的协变方法（**covariant**） 构建量子引力理论的方法之一。它从量子场论出发，尝试找到一种方法以满足爱因斯坦的广义协变性原理。换句话说，就是从预设背景时空的量子场论开始，尝试让它变得背景无关。

裸质量（**bare mass**）　假设一个粒子可以与它产生（或发生相互作用）的量子场完全分离的情况下，粒子所拥有的假想中的质量。这样一来，观测到的粒子质量就是裸质量加上与量子场相互作用而产生的质量。

马赫原理（**Mach’s principle**）　概括来讲，马赫原理认为所有的运动——不管是惯性运动还是加速运动——都应该是相对的。牛顿尝试用一个水桶的例子来证明旋转运动本质上是绝对的，但失败了，因为这仍然是水桶相对于整个宇宙的旋转，我们不能分辨是水桶在静止的宇宙中旋转，还是整个宇宙围绕着水桶旋转。局域物理学定律受宇宙的大尺度结构决定。这一原理后被归功于爱因斯坦，而且是他发展广义相对论的重要灵感来源。如今，科学界对此仍有争议，但参考系拖曳现象表明，遥远的物体确实可以通过某种机制产生局部的影响。

慢滚暴胀（**slow-roll inflation**）　宇宙暴胀的持续时长，以及早期宇宙如何从暴胀后的状态产生，受暴胀场中存储的能量密度及场的强度（即大小）影响很大。鉴于暴胀完全是一个假想的过程，理论物理学家可以自由地轻微调整参数，使其能诞生我们如今观察到的宇宙的大尺度结构。在慢滚暴胀中，随着场强度的增加，能量密度只会略微降低，从“假真空”到“真”真空的转变也发生得相对较慢（相对于膨胀的速度而言）。这使得暴胀的时间足够长，从而可以解决平直性问题和视界问题，同时不会引入新的问题。在场强度达到“真”真空中的值后，能量密度下降得极快，随后暴胀停止，宇宙进入“常规”的状态。见“宇宙暴胀”和“暴胀子场”。

美国国家科学基金会（**National ScienceFoundation，NSF**）　NSF是一个独立的美国联邦政府机构，它负责资助美国科学与工程领域的研究和教育。NSF成立于1950年，2017年它的年度预算是75亿美元。在所有美国联邦政府对美国大学资助的基础研究中，被NSF资助的研究大约占24%。

欧几里得空间（**Euclidean space**） 得名自古希腊数学家欧几里得。这是我们在通常的三维平直空间中熟悉的空间几何，可以用直角坐标系（*x*,*y*,*z*）来描述。在欧几里得空间中，三角形的内角和为180度，圆的周长为其半径的2π倍，平行线永不相交。

泡利不相容原理（**Pauli exclusionprinciple**） 由沃尔夫冈·泡利在1925年发现。泡利不相容原理称，没有两个费米子能同时占据同一个量子态（即拥有同一套量子数）。对于原子中的电子而言，这意味着同一个原子轨道只能容纳两个电子，这两个电子的自旋相反。

平直空间（**flat space**） 见“欧几里得空间”。

普朗克长度（**Planck length**） 见“普朗克尺度”。

普朗克常数（**Planck constant**） 用*h*表示，由马克斯·普朗克在1900年发现。普朗克常数是一个基本物理学常数，反映了量子理论中量子的大小。比方说，光子的能量就通过$E=h\nu$由它的频率决定，即能量等于普朗克常数乘光子的辐射频率。普朗克常数的数值是6.626×10^{-34}焦秒。

普朗克尺度（**Planck scale**） 普朗克尺度由量子力学和相对论核心的三个物理学基本常数定义。这三个常数依次是约化普朗克常数$\hbar$（普朗克常数*h*除以2π——来自量子力学）、光速*c*（来自狭义相对论）和牛顿引力常量*G*（在广义相对论里出现过）。普朗克长度的表达式是，它的值约为1.6×10^{-35}米。普朗克时间的表达式是$\sqrt{\hbar G/c^5}$，是光走过普朗克长度所需的时间，它的值约为5.4×10^{-44}秒。普朗克质量的表达式是$\sqrt{\hbar c/G}$，约为2.2×10^{-8}千克，即约为0.022毫克。根据普朗克长度，我们可以导出普朗克面积$\hbar G/c^3$（2.6×10^{-70}平方米）和普朗克面积（$\hbar G/c^3$）$^{3/2}$（4.2×10^{-105}立方米）。有了普朗克质量，我们可以通过$E=mc^2$导出普朗克能量，即$\sqrt{\hbar c^5/G}$，它的值约为2.0×10^9焦。将普朗克质量

和普朗克体积组合起来，则可以得到普朗克密度$c^5/\hbar G^2$，它的值约为5.2×10^{96}千克每立方米。

普朗克时间（**Planck time**）　见“普朗克尺度”。

谱（**spectrum**）　任何一个物理性质，如果它有一系列可能取的值，我们都可以说它有一个谱。最明显的例子就是光通过棱镜，或者通过一系列小水滴形成的彩虹。谱可以是连续的（如彩虹），也可以是离散的，由一系列特定的值组成。氢原子的吸收或发射谱就展现出一系列的“线”，它们对应于被原子吸收或发射的辐射的频率。这些线在谱中的位置（频率）与原子的电子轨道能量有关。

奇点（**singularity**）　广义相对论允许无穷大的质能密度和引力场强度存在，这种情况下时空的曲率也达到无穷大，这样的点被称为奇点。广义相对论预言在黑洞的中心就有奇点，整个宇宙的“开端”，即发生大爆炸的一瞬间，也是一个奇点。虽然这两种奇点的几何性质不同，但这些都只是数学上的奇点，通过圈量子引力等将空间本身量子化的理论可以将其完全消除。

奇夸克（**strange quark**）　第二代夸克之一，电荷为–1/3，自旋为1/2（费米子），质量为95 MeV/c^2。20世纪四五十年代，默里·盖尔曼及与之独立研究的西岛和彦与中野董夫都在一系列能量相对较低（即质量相对较小）的粒子身上发现了一种名为“奇异性”的性质。后来，盖尔曼和乔治·茨威格发现这种性质来自复合粒子中的奇夸克。

奇异性（**strangeness**）　描述电中性Λ粒子、电中性和带电的Σ粒子、Ξ粒子和K介子等粒子的特征性质。在默里·盖尔曼和尤瓦尔·内埃曼（Yuval Ne’eman）提出的“八重法”中，奇异性、电荷和同位旋一同被用来给粒子分类。后来，这一性质被追溯到复合粒子中所包含的奇夸克。

强力（**strong force**） 强力，又称色力，是重子中把夸克和胶子捆绑在一起的力，由量子色动力学描述。在原子核中把质子和中子结合在一起的力（又称强核力）被认为是核子中把夸克捆绑在一起的力“泄漏”出来的结果。见“色力”。

强子（**hadron**） 来自希腊语的“*hadros*”，意为“厚”或“重”。强子形成了一类粒子，它们受强核力的作用，因而由夸克以多种方式组合而成，包括由三个夸克组成的重子，以及由一个夸克和一个反夸克组成的介子。

轻子（**lepton**） 来自希腊语“*leptos*”，意味着“小”。轻子形成了一系列不参与强核力，也不与夸克相组合形成物质的粒子。与夸克一样，轻子共有三代，包括电子、μ子和τ子，其电荷都为–1，自旋都为1/2，质量分别为0.51 MeV/c^2，105.7 MeV/c^2，1.78 GeV/c^2。它们各自对应一个中微子，分别为电子中微子、μ子中微子和τ子中微子。这三种中微子都不带电，自旋为1/2，人们认为它们都带有一个非常小的质量（为了解释中微子振荡现象，即中微子的味会发生混合乃至随着时间改变的现象，这一非常小的质量是必需的）。

圈量子引力（**loop quantum gravity**，**LQG**） 一种量子引力理论，从基于广义相对论约束哈密顿量形式利用自旋联络（阿什特卡变量）重新表述的正则方法导出。圈量子引力预言了面积量子与体积量子的存在，其尺度分别为普朗克长度的平方和三次方。见“普朗克尺度”和“自旋泡沫”。

圈量子宇宙学（**loop quantumcosmology**，**LQC**） 一种基于圈量子引力原理的量子宇宙学理论。圈量子宇宙学可以避免大爆炸奇点的出现，因为圈量子引力要求空间不能被压缩到比单个空间体积量子更小的体积里。圈量子宇宙学还预言了超暴胀，但这不足以解释宇宙的大尺度结构，因此该理论仍然需要暴胀子场。见“超暴胀”和“自旋泡沫”。

弱力/相互作用（**weak force/interaction**） 弱力之所以被称为弱力，是因为它在其作用范围内，强度小于强力和电磁力。弱力会影响夸克和轻子：弱相互作用会改变夸克和轻子的味，例如把一个上夸克变成一个下夸克，以及把电子变成电子中微子。弱力最初是在对β放射性衰变的研究中被识别出来，称为一种基本作用力的。弱力的传递者为W粒子和Z粒子。1967—1968年，史蒂文·温伯格和阿卜杜勒·萨拉姆把弱力与电磁力统一了起来，形成了关于电弱力的量子场论。

色荷（**colour charge**） 夸克除了味（上、下、奇、粲、顶、底）之外拥有的另一种属性。与电荷不同（电荷分为两种，正电荷与负电荷），色荷分为三种，物理学家分别称为红、绿、蓝。当然，用了这套颜色的命名体系并不意味着夸克带有我们通常所见到的颜色。夸克之间的色力由带色的胶子传递。

色力（**colour force**） 指强子中将夸克与胶子束缚在一起的强作用力。与我们更熟悉的力（如引力和电磁力）不同，色力并不会随着距离增加而减弱，而是像一根弹簧，把夸克拴在一起。当夸克间的距离减小时，“弹簧”放松，夸克可以几乎完全自由地运动，但一旦夸克间距离增大，“弹簧”就会被拉紧，让夸克保持被约束的状态。原子核内部将质子与中子结合在一起的强核力，就是色力以某种方式“泄漏”到核子之外产生的效果。

施瓦西解/半径（**Schwarzschildsolution/radius**） 1916年，德国物理学家卡尔·施瓦西在德国军队服役时，首次提出了爱因斯坦引力场方程的精确解。施瓦西解建立了一道根本的边界，称为施瓦西半径。一个带有质量m的球状物体，如果被压缩到施瓦西半径（由Gm/c^2给出，其中c为光速，G为引力常量）之内，它就会变成一个黑洞——它的逃逸速度超过了光速。

时空与时空度规（**spacetime andspacetime metric**） 在一个坐标

系中，一个位置与另一个位置之间的距离可以通过两个位置的坐标来计算。在三维欧几里得空间中，一个点的坐标是（x_1，y_1，z_1），另一个点的坐标是（x_2，y_2，z_2），那么应用毕达哥拉斯定理，我们就知道$\Delta l^2=\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2$。这个“距离函数”经常被称为度规。它有一个重要的属性：无论我们如何定义坐标系（无论我们如何定义x，y，z），度规永远不变（用数学的术语说，就是它拥有“不变性”）。给欧几里得空间加上第四个维度——时间以后，为了保证得到的时空度规不变，我们需要这样一个结构：$\Delta s^2=\Delta(ct)^2-\Delta x^2-\Delta y^2+\Delta z^2$，这里的s就是广义时空间隔，t是时间，c是光速。当然，我们也可以定义$\Delta s^2=\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2-\Delta(ct)^2$，这样$\Delta s^2$仍是不变的，谁在前谁在后只是选择习惯而已。

守恒律（**conservation law**）　指一类物理学定律，表明孤立系统的一项特定测量性质不会随着系统沿时间的演化而改变。对应于守恒律的测量性质包括质能、线动量和角动量、电荷和色荷、同位旋，等等。根据德国数学家阿马莉·埃米·诺特（Amalie Emmy Noether）提出的一项定理，每条守恒律都对应于系统的某种特定的连续对称性。

太（**tera**）　表示万亿，即10^{12}。1　TeV为1万亿电子伏特，也即10^{12} eV，等于1000 GeV。

威尔逊圈（**Wilson loops**）　在1974年由美国理论物理学家肯尼思·威尔逊和苏联理论物理学家亚历山大·波利亚科夫彼此独立提出，以尝试形成一种可以得到解析解的量子色动力学版本。他们的表述专注于色力的线：量子力学算符作用会让量子场产生一种圈状的局域性基本激发。通过这种方式，力线或者力圈变成了第一性的，而量子场则成为次级的导出产物。

味（**flavour**）　除了色荷以外，另外一种区分夸克的性质。夸克共有6种味，分为三代。上夸克、粲夸克、顶夸克都带+2/3电荷和1/2自

旋，质量分别为1.8~3.0 MeV/c^2、1.28 GeV/c^2、173 GeV/c^2。下夸克、奇夸克、底夸克都带–1/3电荷和1/2自旋，质量分别为4.5~5.3 MeV/c^2、95 MeV/c^2、4.18 GeV/c^2。“味”这个性质有时也用于轻子，包括电子、μ子、τ子，以及它们对应的中微子，可以用“轻子味”将其区分开。见“轻子”。

希格斯玻色子（**Higgs boson**） 得名于英国物理学家彼得·希格斯。所有的希格斯场都有一种特征场粒子，称为希格斯玻色子。不过，“希格斯玻色子”这一术语一般用来表示电弱希格斯粒子，它是1967至1968年史蒂文·温伯格和阿卜杜勒·萨拉姆在解释电弱对称性破缺时首次使用的希格斯场的场粒子。2012年7月4日，CERN的大型强子对撞机宣布发现了电弱希格斯玻色子，它呈电中性，自旋为0，质量约为125 GeV/c^2。

希格斯场（**Higgs field**） 得名于英国物理学家彼得·希格斯。这是一种通用术语，用来表示加入场论中，通过希格斯机制触发对称性破缺的背景量子场。CERN对希格斯玻色子的发现，有力地支持了用来让量子场论中的电弱力对称破缺的希格斯场的存在。

希格斯机制（**Higgs mechanism**） 得名于英国物理学家彼得·希格斯，但人们也经常用1964年与希格斯相互独立发现了它的物理学家的名字来称呼它：罗贝尔·布鲁、弗朗索瓦·恩格勒特、杰拉尔德·古拉尔尼克（Gerald Gulalnik）、卡尔·哈根（Carl Hagen）和汤姆·基布尔（TomKibble）。希格斯机制描述了希格斯场这种背景量子场是如何得以加入场论中以使对称性破缺的。1967至1968年，史蒂文·温伯格与阿卜杜勒·萨拉姆使用该机制发展出了一种电弱力的场论。

狭义相对论（**special relativity**） 由爱因斯坦在1915年提出。它认为所有的运动都是相对的，并不存在哪个独一无二的，或者说有特权的参考系，其他所有的运动都需要相对于它来测量。所有的惯性参考系都

是互相等价的——在地球上静止的观察者观察到的结果，应该与相对地球上的观察者做匀速运动的飞船上的观察者观察到的结果相同。随着狭义相对论的提出，经典的绝对空间、绝对时间、绝对静止和绝对的同时性都被推翻了。在表述该理论的过程中，爱因斯坦假设真空中的光速是理论所能达到的最大速度，不可能被超越。狭义相对论之所以被称为“狭义”，是因为它并没有包含加速运动和引力——爱因斯坦在后来提出的广义相对论中讨论了它们。

弦论/**M**理论（**string theory/M-theory**）　在弦论中，粒子物理标准模型中的点粒子被有长度的一维的弦代替。这些弦一开始被认为是连接夸克与反夸克的力线，但在理论发展的过程中，它们变成了普朗克尺度的物体，而所有标准模型中的粒子都被认为是开弦与闭弦的不同的基本振动。弦论的早期版本有很大问题，但在1984年的“第一次超弦革命”中，物理学家将弦论与超对称结合了起来，让它存在于一种复杂的空间/流形（称为卡拉比–丘流形）中，有6个“隐藏”的空间维度。物理学家很快发现，超弦理论有好几个变体，包括被称为I型、IIA型和IIB型，以及另外两种被称为杂化超弦理论（heterotic superstring theory）的理论变体。在1995年的“第二次超弦革命”中，理论物理学家发现所有的变体都可以通过对偶系统联系在一起。爱德华·威滕猜想它们都是同一个包罗万象的结构（他称为M理论）在不同情况或者不同极限下的结果。该理论不再局限于一维的弦，而是包含了多维的膜。

相对性原理（**principle of relativity**）　相对性原理要求所有的物理学定律对一切参考系都具有相同的形式，即与坐标系的选择无关。

信息悖论（**information paradox**）　因为黑洞会发出霍金辐射，它的表面积应该会缩小，并最终完全“蒸发”。这之所以是个问题，是因为黑洞的熵与其表面储存的量子信息之间存在联系。如果这部分信息丢失了或被永久地摧毁了，从而从宇宙中完全消失，这就违反了量子力学的一项重要原则：波函数中编码的所有信息都必须守恒，这一原则可以理

解为某种概率的守恒。黑洞蒸发意味着信息的永久丢失，这就直接违反了量子理论最重要的基础和结构。

虚粒子（**virtual particle**）　虚粒子在早期量子场论中被引入，以表现“真实”粒子之间与力有关的相互作用。尽管就定义而言虚粒子永远不可能被“看到”，但它们的物理效应可以被测量到（每当你把两块条形磁铁的南极推到一起时，你就会感受到这种物理效应）。虚粒子是量子场中转瞬即逝的涨落，其寿命受不确定性原理的限制。它们虽然遵守物理学定律（如能量或动量守恒），但也拥有与实粒子截然不同的性质。虚粒子存在的时间越长，它看起来就越像对应的实粒子。

衍射（**diffraction**）　当光通过一条狭缝或者一个小圆孔（狭缝宽度或者小圆孔直径与波长差不多）时发生的一种物理学现象。用波动描述可以很容易地解释这种现象，在波动描述中，波前的每一点都可作为一个新的球面波的波源。如果不受干扰，这些新的球面波组合起来就会形成一道新的波前，让波得以在空间中向前传播。但如果波被迫穿过一条狭缝或者一个孔，波前就发生弯曲，球面波不再能如此平滑地相互组合。这类组合不仅依赖于波的振幅（高度），也依赖于其相位（即一个特定的点处于波峰–波谷周期中的哪个位置）。这样一来，得到的结果就是干涉条纹（一种由明暗条纹组成的衍射图案）。

杨-米尔斯场论（**Yang-Mills fieldtheory**）　1954年杨振宁与罗伯特·米尔斯发展出的量子场论形式。杨–米尔斯场论为如今的粒子物理标准模型在各方面都打下了基础。

引力（**gravitational force**）　所有质能之间都会产生的一种吸引力。引力极其微弱，完全不影响原子、亚原子和基本粒子之间的相互作用，这样的小尺度世界由色力、弱力和电磁力所主宰。引力的效应由爱因斯坦广义相对论描述，在低质量条件下近似符合牛顿万有引力定律。

引力子（**graviton**）　一种假想中的粒子，在协变量子引力中传递

引力，或者在正则量子引力中表现为一种准粒子。如果引力子存在，它就会是一种无质量、不带电的玻色子，自旋量子数为2。它是引力波的粒子类比。不过，探测到引力子的可能性是极低的。

隐变量（**hidden variables**）　修正或扩展常规量子力学，以消除波函数坍缩现象的最简单的方法，就是引入隐变量。这类隐变量主宰了量子波–粒子的行为，但正如它的定义所揭示的那样，我们无法直接观测到它。如果加入隐变量的扩展理论需要保证单个量子物体一直拥有特定的属性（也就是说，这一物体是“局域实在”的），我们就称隐变量是局域的。如果该扩展理论需要保证量子物体在集体意义上一直拥有特定的属性，这类隐变量就是非局域的。

宇宙暴胀（**cosmic inflation**）　一种急速的指数式宇宙膨胀，被认为发生在大爆炸后10^{-36}到10^{-32}秒间。暴胀由美国物理学家阿兰·古斯在1980年首次提出，可以解释我们如今所观察到的宇宙大尺度结构。更多内容请参见“慢滚暴胀”。

宇宙背景辐射（**cosmic backgroundradiation**）　宇宙大爆炸发生约38万年后，宇宙已经膨胀并冷却到一定程度，可以让氢原子核（质子）和氦原子核（包含两个质子和两个中子）与电子复合，形成电中性的氢原子和氦原子。在这个时候，宇宙开始变得“透明”，可以让剩余的热辐射在其中自由穿行。随着宇宙进一步膨胀，热辐射冷却，频率移到微波和红外区域，温度只有2.7开尔文（–270.5摄氏度），只比绝对零度高几度。这一微波背景辐射由几位理论物理学家预言，并于1964年由阿尔诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊意外观测到。自此以后，COBE、WMAP和普朗克卫星都详细研究了宇宙背景辐射。

宇宙标度因子（**cosmic scale factor**）　一个无量纲的量，常用字母a表示。如果d代表t时刻两点间的固有距离，d_0是此前某个固定时刻t_0这两点间的距离，那么$a=d/d_0$。在一个以固定速率膨胀的宇宙中，d大于

d_0，a是一个固定的大于1的值。哈勃参数H可以定义为a随时间的变化率（通常用$\dot{a}$来表示）除以a。我们可以将$\dot{a}$看成膨胀或收缩的速率。由于d_0是固定的，它不随时间而改变，因此$\dot{a}=\dot{d}/d_0$，其中$\dot{d}$表示固有距离随时间的变化率。我们可以将$\dot{d}$替换成退行速度v。因此，$H=\dot{a}/a=\dot{d}/d=v/d$，即$v=Hd$——退行速度正比于距离，这就是哈勃定律。然而，我们如今知道，膨胀速率并不是常数——$\dot{a}$本身在随着时间而增加，即膨胀在加速。这意味着哈勃参数会随着时间而变化。见“哈勃定律”。

宇宙学常数（**cosmologicalconstant**）　阿尔伯特·爱因斯坦起初抗拒动态宇宙（即宇宙会膨胀或收缩）的概念，因此人为修改了方程以产生静态的解。考虑到常规的引力会把宇宙中的物质向内吸引，导致宇宙自发坍缩，爱因斯坦引入了一个“宇宙学常数”——一种负的引力，即排斥的引力，以抵消该效应。当证明宇宙确实在膨胀的证据逐渐累积的时候，爱因斯坦对此感到很后悔，认为这是自己一生中最大的错误。然而，1998年的进一步发现表明，宇宙的膨胀其实还在加速。在分析了关于宇宙微波背景辐射的卫星测量结果之后，物理学家提出，宇宙充满了“暗能量”，暗能量占宇宙总质能的69.1%。一种暗能量的形式需要重新引入爱因斯坦的宇宙学常数。

宇宙学红移（**cosmologicalredshift**）　从遥远的星系或者超新星发出的光包含一系列频率（或者说波长），这些不同频率的光来自星体中不同原子的不同能态间的发射。这一系列光以光速向地球传播，但在它通往地球的路上，它与地球之间的宇宙空间膨胀了，让光看起来往红色的方向（频率更低，波长更长）移动。就像多普勒效应一样，红移的程度可以用来确定该遥远星系或超新星由于宇宙膨胀而相对于地球退行的表观速度。退行速度与距离看起来呈线性关系，即表观速度正比于距离（哈勃定律）。实际上，正是1998年关于一类特定的超新星的测量表明宇宙的膨胀正在加速。见“哈勃定律”。

原子（**atom**）　来自希腊语“*atomos*”，意为“不可再分”。人们原本

用它来指代物质的最小组成部分，但这个单词现在指的是化学元素的最小单元。水由水分子H_2O组成，水分子由一个氢原子和一个氧原子组成。原子自身又包含质子、中子和电子，质子和中子被束缚在一起形成一个电中性的原子核，电子则以特定形状的波函数（称为“轨道”）围绕着原子核。

原子核（**nucleus**）　原子中心位置的一个致密的区域，这里集中了原子的绝大部分质量。原子核由不同数量的质子和中子组成，氢原子的原子核只由一个质子组成。

兆（**mega**）　前缀，表示10万，即10^6。1 MeV=10^6 eV。

着衣质量（**dressed mass**）　从一个量子波–粒子的自能（来自它同与自身在物理上密不可分的系统的相互作用）中导出的质量。例如，一个电子会与自己产生的电磁场发生作用，从而获得自能。

真空能量（**vacuum energy**）　见“宇宙学常数”。

真空期望值（**vacuum expectationvalue**）　在量子理论中，可观测量（如能量）的大小由对应于该可观测量的量子力学算符的期望值（或称平均值）给出。算符是一种数学函数，它作用于波函数，同时改变了波函数。真空期望值是算符作用于真空产生的期望值。希格斯场的真空期望值不为零，这就打破了电弱力之间的对称性，产生了电磁力和弱力两种不同的力。

正电子（**positron**）　电子的反粒子，用e^+表示，它的电荷为+1，自旋为1/2（费米子），质量为0.511 MeV/c^2。正电子由卡尔·安德森于1932年首次发现，是首个被发现的反粒子。

正则（**canonical**）　量子场论形式的正则方法由保罗·狄拉克提出，作为一种“经典对应方法”。[注]它始于经典场论的“哈密顿量形式”，

将其中的经典变量（如线动量和角动量）替换为对应的量子力学算符，就能维持经典理论的形式结构。量子引力的正则方法始于广义相对论的约束哈密顿量形式，同时找到了一种“量子化”空间的方法。

质量（**mass**）　在经典力学中，一个物体的质量是它在受力时抵抗运动状态变化的量度，人们认为质量与物体包含的“物质的量”有关。因此，它是物质实体的“初级”性质。在狭义相对论和量子力学中，我们对质量的本质的理解发生了巨大的变化。质量变成了一个物体具有的能量的量度（$m=E/c^2$），基本粒子的质量都可追溯到不同类型的量子场相关的能量。

质量重正化（**mass renormalization**）　见“重正化”。

质子（**proton**）　一种带正电的亚原子粒子，由欧内斯特·卢瑟福在1919年首次“发现”并命名。卢瑟福发现的实际上是氢原子的原子核（即单个质子），它也是其他原子核的基本组成成分。质子属于重子，由两个上夸克和一个下夸克组成，自旋为1/2，质量为938.3 MeV/c^2。

中微子（**neutrino**）　在意大利语中意为“小小的中性粒子”。中微子不带电，自旋为–1/2（费米子），与带负电的电子、μ子和τ子相对应。中微子被认为拥有很小的质量，这一质量是解释中微子振荡（即中微子的味会发生混合，乃至随着时间改变的现象）所必需的。中微子振荡解决了太阳中微子问题，也就是穿过地球的中微子数量与太阳核心发生的核反应应当产生的中微子数量不符的问题。2001年，实验测定来自太阳的中微子只有35%是电子中微子，其余的都转变成了μ子中微子和τ子中微子，这意味着中微子在从太阳飞向地球的过程中味发生了变化，即发生了振荡。

中子（**neutron**）　一种电中性的亚原子粒子，由詹姆斯·查德威克（James Chadwick）在1932年首次发现。中子是一种重子，由一个上夸

克和两个下夸克组成，自旋为1/2，质量为939.6 MeV/c^2。

重子（**baryon**）　来自希腊语的“*barys*”，意为“重”。重子是强子的一类，它们质量较大，受到强核力的作用。质子和中子都属于重子。重子由3个夸克组成。

自能（**self-energy**）　在量子场论中，粒子被视为场的本质涨落，或者说振动。这一观念带来的结果之一就是，粒子会发生自相互作用，即与自身的场发生相互作用。这类相互作用增加了粒子的能量，增加的这部分能量被称为自能。在早期关于电子的量子场论版本中，电子的自能达到无穷大。引入重正化的数学技巧后，这个问题得到了解决。

自旋（**spin**）　所有的基本粒子都表现出一类角动量，叫自旋。尽管电子的自旋一开始被解释为“绕着自身的一个轴旋转”，但自旋是一种相对论性的现象，在经典物理学中无法找到对应。每种粒子都有其特定的自旋量子数。自旋量子数为半整数的粒子被称为费米子，自旋量子数为整数的粒子被称为玻色子。物质粒子是费米子，力粒子是玻色子。

自旋联络（**spin connection**）　在一个平坦的表面移动一个矢量很简单，但在曲面上移动矢量就会带来问题。意大利数学家图利奥·列维–奇维塔发展出了一种数学技巧，可以记录矢量在表面移动时的取向。他的方法要求我们不要想象矢量在表面上移动，而是想象表面在移动。在表面为球面的情况下，这一技巧被称为列维–奇维塔球面联络。20世纪70年代末，类似的逻辑被用于代表自旋角动量的矢量的平行移动，带来一系列联络系统（被称为自旋联络），在固体物理学中有一些应用。阿米塔巴·森意识到，它可以用来重新表述广义相对论的ADM哈密顿量形式，将时空度规替换成自旋联络，这样就可以导出我们更熟悉的弯曲时空。森的工作为阿什特卡的“新变量”奠定了基础。

自旋泡沫（**spinfoam**）　一个自旋网络只能表示一个静态的图像，因此不能用来模拟在时间中展开的动力学图景。为了把时间重新引入圈

量子引力，我们把一张张自旋网络叠在一起，以追踪节点和连接的演化关系。这样，由节点和连接组成的二维的图就变成了一个三维的物体，节点变成边，连接变成面。边“带有”一个特定的空间体积，而面则“带有”一个特定的面积。如此，就得到了自旋泡沫，我们可以用费曼的量子力学路径积分（即对历史求和）表述来追踪对象从始至终的动力学演化。时空可以从自旋泡沫中演生出来。“自旋泡沫”这个词致敬了惠勒早先对于普朗克尺度的时空会是一种“量子泡沫”的直觉。

自旋网络（**spin network**） 由罗杰·彭罗斯在20世纪70年代初发展出来，目的是在不以背景时空为前提的情况下表示基本物理学相互作用。我们可以认为这种相互作用包含了粒子和场，但这也不是很重要，彭罗斯仅仅把它们看作携带着自旋角动量的“物体”。一个自旋网络包含顶点（即节点），它们之间由携带着一个数值的线相连，这个数值是自旋角动量除以角动量单位（$1/2\hbar$，$\hbar$为普朗克常数除以2π）得到的整数结果。彭罗斯证明，只要网络携带的总角动量足够大，就能在此网络和其他很大的网络之间建立起相对的方向，这暗示着在这样的自旋网络中演生出了空间。圈量子引力也独立得到了非常类似的网络，其中的节点被解释为空间体积的离散量子，连线则为相邻的小体积空间相接的离散的面积量子。

---

1. P.A.M.Dirac,The Principles of Quantum Mechanics,4th edn,Oxford University Press,Oxford,1958,p.84.

注释

在标注正文中所引用的科学文献来源的时候，我尽可能同时提供了原始发表的文章和发布在康奈尔大学运营的论文预印本资料库网站arXiv上的版本。论文预印本可以从arXiv网站的主页http://arxiv.org上免费获取，只需在搜索框中输入文章识别码即可。对于同时给出了原始发表文章出处和预印本识别码的条目，我在文中引用的原文一般都来自预印本。

参考文献

Ashtekar,Abhay,and Pullin,Jorge (eds),Loop Quantum Gravity: The First 30 Years,World Scientific,Singapore,2017.

Baggott,Jim,The Quantum Story: A History in 40 Moments,Oxford University Press,Oxford,2011.

Baggott,Jim,Higgs: The Invention and Discovery of the 'God Particle',Oxford University Press,Oxford,2012.

Baggott,Jim,Farewell to Reality: How Fairy-tale Physics Betrays the Search for Scientific Trut,Constable,London,2013.

Barbour,Julian,The End of Time: The Next Revolution in Our Understanding of the Universe,Phoenix,London,2000.

Barrow,John D.,and Tipler,Frank,The Anthropic Cosmological Principle,Oxford University Press,Oxford,1986.

Bell,J.S.,Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. Cambridge University Press,Cambridge,UK,1987.

Burton,Howard,First Principles: The Crazy Business of Doing Serious Science,Key Porter Books,Toronto,2009.

Calaprice,Alice,The Ultimate Quotable Einstein,Princeton University Press,Princeton,NJ,2011.

Carroll,Sean,The Particle at the End of the Universe: The Hunt for the Higgs and the Discovery of a New World,Oneworld Publications,London,2012.

Cartwright,Nancy,How the Laws of Physics Lie,Oxford University Press,Oxford,1983.

Conlon,Joseph,Why String Theory?,CRC Press,Boca Raton,FL,2016.

Cox,Brian,and Forshaw,Jeff,Why Does $E=mc^2$? Da Capo Press,Cambridge,MA,2009.

Crease,Robert P.,and Mann,Charles C.,The Second Creation:Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics,Rutgers University Press,New Brunswick,NJ,1986.

Davies,P.C.W.,and Brown,J.R.(eds),The Ghost in the Atom,Cambridge University Press,Cambridge,UK,1986.

Davies,P.C.W.,and Brown,Julian (eds),Superstrings: A Theory of Everything?,Cambridge University Press,Cambridge,UK,1988.

DE Broglie,Louis,'Recherches sur la Théorie des Quanta',Ph.D.Thesis,Faculty of Science,Paris University,1924.English translation by A.F.Kracklauer.

D'Espagnat,Bernard,Reality and the Physicist,Cambridge University Press,Cambridge,UK,1989.

DeWitt,Bryce S.and Graham,Neill (eds),The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics,Pergamon,Oxford,1975.

Dirac,P.A.M.,The Principles of Quantum Mechanics,4th edn,Oxford University Press,Oxford,1958.

Dirac,Paul A.M.,Lectures on Quantum Mechanics,Dover,New York,2001.Einstein,Albert,Relativity: The Special and the General Theory,100th anniversary edition,Princeton University Press,Princeton,NJ,2015.

Feynman,Richard,The Character of Physical Law,MIT Press,Cambridge,MA,1967.

Feynman,Richard P.,QED: The Strange Theory of Light and Matter,Penguin,London,1985.

Feynman,Richard P.,Leighton,Robert B.,and Sands,Matthew,The Feynman Lectures on Physics,vol.III.Addison-Wesley,Reading,MA,1965.

Fine,Arthur,The Shaky Game: Einstein,Realism and the Quantum Theory,2nd edn,University of Chicago Press,Chicago,1986.

French,A.P.,Special Relativity,Van Nostrand Reinhold,Wokingham,1968.

Gambini,Rodolfo,and Pullin,Jorge,A First Course in Loop Quantum Gravity,Oxford University Press,2011.

Gardner,Sebastian,Kant and the Critique of Pure Reason,Routledge,Abingdon,1999.

Gell-Mann,Murray,The Quark and the Jaguar,Little,Brown,London,1994.

Glashow,Sheldon L.,with Bova,Ben,Interactions: A Journey through the Mind of a Particle Physicist and the Matter of This World,Warner Books,New York,1988.

Gleick,James,Genius: Richard Feynman and Modern Physics. Little,Brown,London,1992.

Gorelik,Gennady E.,and Frenkel,Viktor Ya.,Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties,Birkhäuser Verlag,Basel,1994.

bibliography.405 Greene,Brian,The Elegant Universe: Superstrings,Hidden Dimensions and the Quest for the Ultimate Theory,Vintage Books,London,2000.

Greene,Brian,The Fabric of the Cosmos: Space,Time and the Texture of Reality,Allen Lane,London,2004.

Greene,Brian,The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos,Allen Lane,London,2011.

Guth,Alan H.,The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins,Vintage,London,1998.

Hawking,Stephen,A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes,Bantam Press,London,1988.

Hawking,Stephen,and Mlodinow,Leonard,The Grand Design:New Answers to the Ultimate Questions of Life,Bantam Press,London,2010.

Heisenberg,Werner,Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science. Penguin,London,1989 (first published 1958).

Heisenberg,Werner,Physics and Beyond: Memories of a Life in Science,George Allen & Unwin,London,1971.

Isaacson,Walter,Einstein: His Life and Universe,Simon & Shuster,New York,2007.

Isham,Chris J.,Lectures on Quantum Theory,Imperial College Press,London,1995.

Kant,Immanuel,Critique of Pure Reason,trans.J.M.D.Meiklejohn,J.M.Dent & Sons,London,1988.

Kennedy,J.B.,Space,Time and Einstein: An Introduction,Acumen,Chesham,2003.

Kennedy,Robert E.,A Student's Guide to Einstein's Major Papers,Oxford University Press,Oxford,2012.

Kragh,Helge,Higher Speculations: Grand Theories and Failed Revolutions in Physics and Cosmology,Oxford University Press,Oxford,2011

Krauss,Lawrence M.,A Universe from Nothing: Why There is Something Rather than Nothing,Simon & Schuster,London,2012.

Kuhn,Thomas S.,The Structure of Scientific Revolution,2nd edn,University of Chicago Press,Chicago,1970.

Kuhn,Thomas S.,Black-body Theory and the Quantum Discontinuity 1894–1912,University of Chicago Press,Chicago,1978.

Lederman,Leon (with Dick Teresi),The God Particle: If the Universe is the Answer,What is the Question?,Bantam Press,London,1993.

Leibniz,Gottfried Wilhelm,Philosophical Writings,trans.Mary Morris and G.H.R.Parkinson,J.M.Dent & Sons,London,1973.

Mangeibera Unger,Roberto,and Smolin,Lee,The Singular Universe and the Reality of Time,Cambridge University Press,Cambridge,UK,2015.

Mehra,Jagdish,The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman,Oxford University Press,Oxford,1994.

Moore,Walter,Schrödinger: Life and Thought, Cambridge University Press,Cambridge,UK,1989.

Murdoch,Dugald,Niels Bohr's Philosophy of Physics,Cambridge University Press,Cambridge,UK,1987.

Nussbaumer,Harry,and Bieri,Lydia,Discovering the Expanding Universe,Cambridge University Press,Cambridge,UK,2009.

Pais,Abraham,Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein.Oxford University Press,Oxford,1982.

Panek,Richard,The 4% Universe: Dark Matter,Dark Energy and the Race to Discover the Rest of Reality,Oneworld,Oxford,2011.

Penrose,Roger,The Emperor's New Mind: Concerning Computers,Minds and the Laws of Physics,Vintage,London,1990.

Penrose,Roger,The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe,Vintage,London,2005.

Penrose,Roger,Fashion,Faith and Fantasy in the New Physics of the Universe,Princeton University Press,Princeton,NJ,2016.

Randall,Lisa,Warped Passages: Unravelling the Universe's Hidden Dimensions,Penguin Books,London,2006.

Randall,Lisa,Knocking on Heaven's Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World,Random House,London,2011.

Rees,Martin,Just Six Numbers: The Deep Forces that Shape the Universe,Phoenix,London,2000.

Rindler,Wolfgang,Introduction to Special Relativity.Oxford University Press,Oxford,1982.

Robinson,Andrew,Einstein: A Hundred Years of Relativity,Princeton University Press,Princeton,NJ,2015.

Rovelli,Carlo,What is Time,What is Space?,de Renzo Editore,Rome,2006.

Rovelli,Carlo,Quantum Gravity,Cambridge University Press,Cambridge,UK,2007.

bibliography.407 Rovelli,Carlo,Seven Brief Lessons on Physics,Allen Lane,London,2015.

Rovelli,Carlo,Reality is Not What it Seems: The Journey to Quantum Gravity,Allen Lane,London,2016.

Rovelli,Carlo,and Vidotto,Francesca,Covariant Loop Quantum Gravity:An Elementary Introduction to Quantum Gravity and Spinfoam Theory,Cambridge University Press,Cambridge,UK,2014.

Schilpp,Paul Arthur (ed.),Albert Einstein: Philosopher-Scientist,Library of Living Philosophers,Vol.1,Harper & Row,New York,1959 (first published 1949).

Schweber,Silvan S.,QED and the Men Who Made It: Dyson,Feynman,Schwinger,Tomonaga,Princeton University Press,Princeton,NJ,1994.

Singh,Simon,Big Bang: The Most Important Scientific Discovery of All Time and Why You Need to Know About It,Harper Perennial,London,2005.

Smolin,Lee,The Life of the Cosmos,Oxford University Press,Oxford,1997.

Smolin,Lee,Three Roads to Quantum Gravity: A New Understanding of Space,Time and the Universe,Phoenix,London,2001.

Smolin,Lee,The Trouble with Physics: The Rise of String Theory,the Fall of a Science,and What Comes Next,Penguin Books,London,2008.

Smolin,Lee,Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe,Penguin Books,London,2014.

Stachel,John (ed.),Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics,Princeton University Press,Princeton,NJ,2005.

Steinhardt,Paul J.,and Turok,Neil,Endless Universe: Beyond the Big Bang,Weidenfeld & Nicolson,London,2007.

Susskind,Leonard,The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design,Little,Brown,New York,2006.

Susskind,Leonard,The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics,Little,Brown,New York,2008.

Tegmark,Max,Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality,Penguin Books,London,2015.

Thorne,Kip S.,Black Holes and Time Warps: Einstein’s Outrageous Legacy,W.W.Norton,New York,1994.

Van Fraassen,Bas C.,The Scientific Imag,Oxford University Press,Oxford,1980.

Veltman,Martinus,Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics,World Scientific,London,2003.

Weinberg,Steven,The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe,Basic Books,New York,1977.

Weinberg,Steven,Dreams of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature,Vintage,London,1993.

Wheeler,John Archibald,with Ford,Kenneth,Geons,Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics,W.W.Norton,New York,1998.

Wheeler,John Archibald,and Zurek,Wojciech Hubert (eds),Quantum Theory and Measurement,Princeton University Press,Princeton,NJ,1983.

Whitaker,Andrew,John Stewart Bell and Twentieth-Century Physics:Vision and Integrity,Oxford University Press,Oxford,2016.

Wilczek,Frank,The Lightness of Being: Big Questions,Real

Answers,Allen Lane,London,2009.

Woit,Peter,Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Continuing Challenge to Unify the Laws of Physics,Vintage,London,2007.

Yau,Shing-Tung,and Nadis,Steve,The Shape of Inner Space: String Theory and the Geometry of the Universe’s Hidden Dimensions,Basic Books,New York,2010.

Zee,A.,Fearful Symmetry: The Search for Beauty in Modern Physics,Princeton University Press,Princeton,NJ,1999.

Zee,A.,Quantum Field Theory in a Nutshell,Princeton University Press,Princeton,NJ,2003.

图片来源

图**1a.** Source: Jim Baggott, Origins (Oxford University Press, 2015), Figure 9. Phil Degginger / Alamy Stock Photo.

图**2.** Source: Jim Baggott, Origins (Oxford University Press, 2015), Figure 2.

图**5.** Source: Adapted from Jim Baggott, Mass (Oxford University Press, 2017), Figure 2.

图**6.** Source: Reproduced from American Journal of Physics, Volume 57, Issue 2, pp. 117-20. Publication date: 02/1989. Title: Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. Authors: Tonomura, A.; Endo, J.; Matsuda, T.; Kawasaki, T.; Ezawa, H, with the permission of the American Association of Physics Teachers.

图**8.** Source: Adapted from Jim Baggott, Mass (Oxford University Press, 2017), Figure 16.

图**9.** Source: Adapted from Jim Baggott, Mass (Oxford University Press, 2017), Figure 21.

图**10.** Source: Adapted from Jim Baggott, Mass (Oxford University Press, 2017), Figure 22, original from Cush / Wikimedia Commons / Public Domain.

图**11.** Source: © 2006 by Eugene Antipov/Dual-licensed under the GFDL and CC-By-SA-2.5, 2.0, and 1.0.

图**13.** Source: Adapted from Jim Baggott, Origins (Oxford University Press, 2015), Figure 32.

图**14.** Source: Jim Baggott, Origins (Oxford University Press, 2015), Figure 20, original images from ESA and the Planck Collaboration; NASA / WMAP Science Team.

图**15.** Source (south-pointing chariot): Joseph Needham, Science and Civilization in China, Volume 4: Physics and Physical Technology, Part II: Mechanical Engineering © Cambridge University Press, 1965.

图**16.** Source: Lunch/ Wikimedia Commons/ CC-BY-SA-2.5

图**17.** Source: Thor’s hammer: Oscar Montelius, Kulturgeschichte Schwedens von den ältesten Zeiten bis zum elften Jahrhundert nach Christus (1906), page 309.

图**18.** Source: Foxman/ Wikimedia Commons/ Public Domain.

图**19.** Source: Adapted from: Fig. 2, Roger Penrose, ‘Angular Momentum: An Approach to Combinatorial Space-time’, first published in Ted Bastin (ed.), Quantum Theory and Beyond (Cambridge University Press, 1971), pp. 151–180.

图**20.** Source: Adapted from: Fig. 1, Carlo Rovelli, ‘Loop Quantum Gravity: The First 25 Years’, Classical and Quantum Gravity 28 (2011), 153002.

图**21.** Source: Adapted from Lee Smolin, ‘Atoms of Space and Time’, Scientific American, January 2004, p. 73.

图**22.** Source: Adapted from SiBr4 - Own work, CC BY-SA 3.0,

https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29799005.

图**23.** Source: Adapted from Davide Castelvecci and Valerie Jamieson, ‘You Are Made of Space-time’, New Scientist, 12 August 2006; and Sundance O. Bilson-Thompson, ‘A Topological Model of Composite Preons’, arXiv:hep-ph/0503213v2, 27 October 2006.

图**25.** Source: Republished with permission of World Scientific Publishing Co., Inc, Figure 1 from ‘Loop Quantum Cosmology’, by Ivan Agullo and Parampreet Singh, in Abhay Ashtekar and Jorge Pullin (Eds.), Loop Quantum Gravity: The First 30 Years (2017); permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

图**26.** Source: Adapted from Jim Baggott, Mass (Oxford University Press, 2017), Figure 12.

图**28.** Source: VICTOR DE SCHWANBERG/SPL/agefotostock.

图**29.** From Galileo Galilei, Dialogues Concerning Two New Sciences, translated by Henry Crew and Alfonso di Salvio, Macmillan, New York, 1914. This illustration appears on p. 249.

图**30.** Source: Photo by Claudio Perini, taken at the Loops ’07 International Conference on Quantum Gravity, 25-30 June 2007, Morelia, Mexico.